

---

---

## 巻 頭 言

---

---

### 土作りに土壤物理の知識と応用技術の積極的活用化を望む

前 田 隆\*

近年、土作りが水田、畑を問わず叫ばれている。水田では昭和55～58年の連続冷害で、低生産性水田は耕起層が浅く、冷害に弱いことが問題になった。また施設園芸や露地栽培の野菜などで、連作障害が非常に増大している。施設園芸では塩類の集積、露地栽培では無機質肥料の多施用および大型機械走行による踏圧のため、土壤が非常に堅密化している。そのためエアージェンによる空気の注入を併せて土壤の膨軟化をはかる例もある。永年牧草地では一回の刈取りに大型トラクターが最低7～8回同じ牧草地に入るようになり、機械走行による牧草の損傷の増加、踏圧による土壤の物理性の悪化が、年々牧草の生産性低下をまねきつつある。また昨年のミカン園の干害では、表土流亡園および土層の堅密化によるミカンの浅根性が問題点として指摘された。

次に米需給の関係から、水田の汎用農地化に、積極的に対応せざるを得ないが、畑転換では、土壤の排水性改良が必須である。

以上のように、水田、畑、樹園地、施設園芸などすべての農地における土壤の悪化の改良が必須となって、土作りが叫ばれている。

これら土作りの問題は、土壤の物理性改良によるところが大きく、土壤物理の重要性の認識と知識の啓蒙が今ほど求められている時はないといって過言ではなかろう。

最近、水田では土壤中湛水直播栽培、畑転換では畝栽培、土壤の膨軟化には心土破碎、深耕、連作障害対策には深耕、反転客土などの混層耕による土層改良、永年牧草地で簡易更新技術としてディスクプラウによる牧草切断など、従来の技術と新技術が土壤の悪化改善対策として適用されてつつある。

また土作りをめざした種々の新しい農業機械も開発されている。

前号で岩田前会長が学問としての土壤物理の活性化の必要性を主張された。確かに近年土壤物理の研究者が減少しつつあり、新しい道筋の発展は是非とも必要である。しかし筆者は今まで集積された日本の土壤物理の知識と応用技術を土作りの問題にもっと地道ではあるが、積極的に活用することを期待したい。

それには、農地の物理性の測定値にもとづいた応用技術の適用が、物理性をいかに改善したかを測定値として示す研究報告が、水田、畑、樹園地、施設園芸を問わずもっと多数出されることが必要と思われる。

確かに土壤の物理性の測定は、他の土壤科学分野と違って、多量の試料の採取、測定時間の長いことなど種々の困難があるが、土壤の物理性測定値は、他の土壤科学分野にも基礎データを提供することでもあり、我々にはもっと積極的に、上述の問題にとりくむとともに、行政、農業団体、農家などに、今まで蓄積された土壤物理の知識と応用技術の活用化を啓蒙していく必要がある。

---

\*北海道大学農学部

## 「土壤構造の改良をめぐる諸問題」

今回のシンポジウムで、土壤構造の問題をとりあげたのには二つの意味があります。一つは、今後の日本農業の展望とのかかわりです。米の過剰という問題と関連して、これからの日本農業は、今までのように稲作中心であることはできない。畑作物を稲作と同等に位置づけることが要求される訳です。こうなりますと、構造問題がクローズアップされざるをえない。畑は水田と違って、その生産性が土壤構造の良し悪しに大きく影響されるからです。しかし、わが国の土壤学は水田を中心に発展してきておりますので、畑に関連するものは大変遅れているのが実状です。そういうことで、こちら辺で畑の構造というものを見直してみようと思ったのです。

もう一つは、土壤物理学自身もつ課題とのかかわりです。古くから、土壤構造についての研究が非常に多くなされていますが、どうもはっきりしない。何かヌルヌルとしたままに残っているのです。形態学的な解析がなされてきたのですが、それを定量化することができないのです。御存知のように、構造は土壤のすべての機能の源になっています。いわば、畑に関する技術と最も深くかかわっている課題なのです。これをはっきり把握できなくては、科学としての存在意義を疑われてもしょうがないとさえ言えるような問題なのです。そう簡単に解決できるものではないにしても、10年に一度位は意識的に討議してゆくことが必要だと思うのです。

今日は、ぜひ、活発な討議をしていただき、その中から新しい発展の芽が育つことを心から期待します。

(岩田会長挨拶より)

- 1 土壤空気と作物生育 ..... 阿江 教治 (中国農試)
- 2 ヒドロキシアルミと粘土の相互作用 ..... 和田 光史 (九州大)
- 3 粘質土壤の易耕性からみた土壤構造の評価法 ..... 中野 啓三 (四国農試)
- 4 力学性にもとづく土壤構造の評価法 ..... 新垣 雅裕 (三重大)
- 5 基盤整備水田と土壤構造 ..... 上田 弘美 (鳥取農試)
- 6 機械耕うんによる土壤物理性の改良 ..... 唐橋 需 (農業機械化研)
- 7 総合討論 ..... 座長 古畑 哲 (農環研), 長田 昇 (三重大)

(1984.11.22 於 農土試)

# 土壌空気と作物生育

——水田変換畑における大豆栽培を中心として——

阿 江 教 治\*

Response of Soybean Growth to Soil Aeration

—— Relevant to Crop Diversification in paddy Fields ——

Noriharu AE

Chugoku National Agricultural Experiment Station

## 1. はじめに

水田再編対策の実施にとともに、排水土壌管理技術について数多くの報告がある。しかし、種々の土壌の通気性と作物生育との間の法則性については、十分に解明されてはいない。多様な転換畑作物（大豆、ソルガム、トウモロコシ、ハトムギ、牧草など）を対象とするとき、耐湿性に対する生理的特性と土壌の通気性との関係は、より複雑なものになると思われる。

しかし、このような問題を解決する方法として、久保田<sup>1)</sup>は、作物根系の生理的特性を把握し、土壌環境（特に、土壌中の酸素・炭酸ガス分圧、温度、塩類濃度、水分など）に対する作物根の臨界点を明らかにすることによって、土壌管理技術の方向が呈示できるものと指摘している。

中国農業試験場においても、1979年以来転換畑大豆の栽培試験が実施されてきた。大豆以外にソルガムを供試して、種々な種類の水田土壌を使用してその生育を比較検討した結果、土壌の物理的な計測値が作物生育の絶対的な指標とはなり得ないことが痛感された。すなわち、作物の種類によりその生理的臨界点が異なり、そのため

圃場における作物収量と土壌の物理性との関連づけることは困難な場合が多いことである。

本報告では、地下水位が高い多湿条件下の火山灰土壌では通気性が著しく劣り湿害の発生しやすい環境にあることを確認するとともに、土壌の空気あるいは通気性に関して、作物サイドからの評価をこころみた。

また、作物の生理的臨界点を考慮した上で、多様な土壌の通気性を統一的に評価する上で、O.D.R.（酸素拡散係数）が適していることについての一連の研究を紹介する。

## 2. 転換初年目土壌における大豆の生育

中国地域を代表する6種類の水田土壌を充填したライシメータ（強グライ土、グライ土、灰色低地土灰色系、灰色低地土灰褐色系、黄色土、黒ボク土）が1970年、中国農試に設置された<sup>2)</sup>。その後、水稻が栽培されてきたが、1979年には地下水位を20cmに、1983年には40cmに設定して、転換畑初年目の大豆栽培が実施された。得られた子実収量の結果を表-1に示したが、黒ボク土で最も低収となった。この表には、水稻の無窒素栽培の試験結

表-1 転換初年目土壌における大豆の収量 (g/m<sup>2</sup>)

土 壌	ダ イ ズ			水稻無窒素栽培 1970~1979年
	1979年*		1983年**	
	初 年 目	初 年 目		
強 グ ラ イ 土	423	396	314	416
グ ラ イ 土	397	384	201	526
灰色低地土 (灰色系)	418	353	263	341
灰色低地土 (灰褐色系)	407	374	311	369
黄 色 土	478	347	217	417
黒 ボ ク 土	363	312	272	470

\* 地下水位20cm

\*\* 地下水位40cm

\*中国農業試験所

表-2 統群別水田土壌における転換初年目\*の土壌物理性と大豆の収量

土 壌	仮比重	粗孔隙率 (%)	8月30日			10月3日		大豆子実収量 (g/m <sup>2</sup> )
			気相率 (%)	透水係数 (ml/cm <sup>2</sup> ・S)	O. D. R. (10 <sup>-8</sup> /cm <sup>2</sup> ・min)	Mn <sup>2+</sup> (mg/100g)		
強 グ ラ イ 土	1.19	9.3	18.1	5.11×10 <sup>-3</sup>	10.95	0.79	423	
グ ラ イ 土	1.20	7.3	6.5	3.28×10 <sup>-5</sup>	10.52	0.65	397	
灰色低地土(灰色系)	1.27	11.3	17.4	2.99×10 <sup>-3</sup>	15.61	0.70	418	
灰色低地土(灰褐色系)	1.18	8.6	14.2	3.40×10 <sup>-3</sup>	11.45	0.72	407	
黄 色 土	1.19	5.7	12.8	5.40×10 <sup>-4</sup>	17.13	0.91	478	
黒 ボ ク 土	0.67	4.9	6.8	2.91×10 <sup>-4</sup>	4.34	1.81	363	
大豆子実重との 相 関 (r=)	0.664	0.103	0.494	0.126	0.888*	- 0.506	1.000	

\* 地下水位20cm  
土壌pHを6.5に矯正して大豆栽培を行った

果もあわせて表示してあるが、これより黒ボク土の窒素肥沃度は6種の土壌のうち高い方に属するものと思われた。黒ボク土において、転換初年目大豆が低収となった原因にリン酸欠乏を考えるならば、転換後5年を経過しより酸化的条件下におかれた黒ボク土の大豆もリン酸欠乏を呈し低収になるものと思われた。しかし、同じライシメータで4年間連作した大豆の5年目の収量は強グライ土に次いで高い値を得た。以上の事から、転換初年目の黒ボク土において、大豆の収量が低い原因が窒素肥沃度およびリン酸欠乏によると思われない。

1979年および1983年における転換畑初年目大豆の栽培を通じて、登熟期には大豆の下葉が枯れ上がり、葉色があせるという現象が観察された。地下水値が20cmの試験(1979年)では、この現象は特に顕著であった。この時の土壌物理性については表-2に示した。

6種の土壌のうち、黒ボク土の気相率や粗孔隙率は最も小さい値を示したが、気相率についてはグライ土、粗孔隙率については黄色土と近似した値を示した。しかし、O. D. R. は黒ボク土で著しく低い値を示した。黒ボク土で、大豆の葉色があせてきた登熟期(10月3日)に、土壌中のMn<sup>2+</sup>含量を測定したところ、黒ボク土で高い値(1.81mg/100g)を示し、土壌が還元化していること、そのため大豆根系は湿害をうけたものと思われた。子実収量に影響を与える要因を解析するため、土壌の物理的諸性質との関係を検討したところ、O. D. R. と子実収量との間には正の高い相関が認められた<sup>3,4)</sup>。

表-3 統群別土壌における土壌酸素濃度(%)\*

土 壌	深 さ (cm)		
	10cm	15cm	20cm
強 グ ラ イ 土	20.3	20.2	20.2
グ ラ イ 土	20.1	19.6	19.3
灰色低地土(灰色系)	20.4	20.4	20.3
灰色低地土(灰褐色系)	20.3	20.2	20.1
黄 色 土	20.2	20.1	19.9
黒 ボ ク 土	18.4	18.7	17.5

\* 昭和58年9月9日測定(降雨の状態については表-4参照)  
地下水位40cm

上述の結果は、黒ボク土が粗孔隙率や気相率の測定値から推察されるよりも、はるかに通気性(O. D. R. と大豆の生育から考えて)が劣っていることを示しているが、この事をさらに確認する目的で、40cmに地下水位を設定したライシメータ(1983年)での土壌空気中の酸素濃度の測定を行った(表-3)。表-3には、測定の前日および前々日にそれぞれ4.0mmおよび7.5mmの降雨があったときの値を示した。地下10, 15, 20cmにおける酸素濃度については、黒ボク土を除く5種類の土壌で降雨後1日を経過すると20%に回復した。一方、黒ボク土は18~17%と酸素濃度は低下した。表-4には、黄色土と黒ボク土の2種類の土壌についても降雨前後の土壌酸素濃度の変化を示した。これからも、酸素濃度の回復が最も遅れるのが黒ボク土であることが判明した。

表-4 前日の降雨が黒ボク土および黄色土の酸素濃度(%)\*に及ぼす影響

調査日 (昭和58年)	前日の降雨量 (mm)	黒ボク土(深さ)				黄色土(深さ)			
		10cm	15cm	20cm	30cm	10cm	15cm	20cm	30cm
9月1日	0	20.3	20.2	19.7	19.3	20.5	20.5	20.4	20.2
9月8日	7.5	19.4	19.5	18.8	17.9	20.3	20.3	20.2	20.0
9月9日	4.0	18.4	18.7	17.5	16.5	20.2	20.1	19.9	19.5

\* 地下水位40cm



### 3. 大豆根系の生理特徴

黒ボク土において、降雨後の酸素濃度が低下しやすいことを述べたが、酸素濃度が20%から17%へと低下することによって、作物はどのような影響をうけるのか。その生理的な機能を知るために以下の実験を行った。

中国地域で作付されている代表的な大豆、トウモロコシ、ソルガム、ハトムギをポット条件下で栽培し、20~30℃の条件で根系組織の酸素消費量を測定した(表-5)。大豆根は2~4.3  $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$  と他の3作物

表-5 転換畑作物根菜の酸素消費速度

作物	20-30℃における酸素消費速度* ( $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$ )
大豆 根	2.0~4.3
大豆 根粒	10.0~30.0
トウモロコシ	0.8~1.8
ソルガム	1.4~2.4
ハトムギ	1.6~2.8

\* 新鮮重あたり

(0.8~2.8  $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$ ) と比較して、わずかに高い値を示すにすぎないが、しかし根粒は10~30  $\mu\text{l} - \text{O}_2/\text{g}\cdot\text{min}$  と著しく高い酸素消費量を示した。大豆の全生育期間における酸素消費量をソルガムのそれと比較した(図-1)。開花期から根粒が着生しはじめると共に根

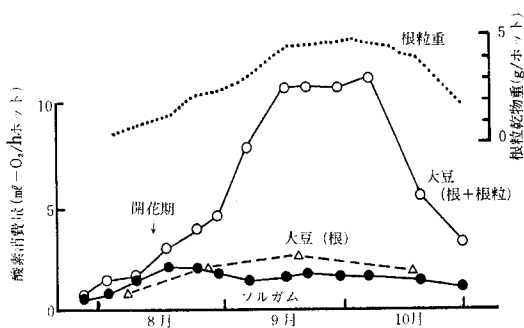


図-1 大豆およびソルガム根系の酸素消費量と大豆根粒重の生育時期別変化

系の全呼吸量は急速に増加し、登熟期には11.0  $\text{ml} - \text{O}_2/\text{h}\cdot\text{ポット}$  と最大に達した。先に、黒ボク土壌では大豆の登熟期に下葉が枯れるなどの湿害症状を呈したことを述べたが、この時期における高い酸素要求量と密接な関係があるものと思われる。根粒を除去した大豆根の酸素要求量は、全呼吸量の約1/4 (2.5  $\text{ml} - \text{O}_2/\text{h}\cdot\text{ポット}$ ) 以下と著しく少なく、これはソルガム全根系の酸素消費

量とほぼ等しかった<sup>3,4)</sup>。

酸素分圧に対する根粒の窒素固定量と呼吸量に及ぼす影響を調査した。Tjepkemaら<sup>5)</sup>の試験結果と同様、根粒を除く根では酸素濃度が10%以下になると呼吸の阻害が観察された。一方、根粒では窒素濃度が20%以下になると急速に呼吸と窒素固定量に阻害が認められ、10%では窒素固定活性はほぼ皆無となった(図-2)。したがって、酸素分圧が20%から17%へと低下すると、窒素固定

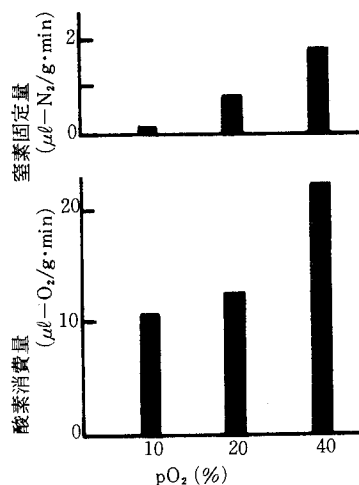


図-2 酸素濃度が大豆根系の呼吸および窒素固定量に及ぼす影響 (30℃, 新鮮重あたり)

量は30%以上も減少するものと試算された。地下水の高い条件下において、黒ボク土の通気性は著しく劣るため、登熟期の大豆根域の土壤酸素濃度は量的にも質的にも低下しやすい条件にある。そのため、表-2で示したように、 $\text{Mn}^{2+}$ が増加し、土壤の還元化が促進するものと考えられた。

水田に隣接する転換畑に大豆とソルガムを栽培し、主根付近の土壤酸素濃度を測定した(図-3)。その結果、同一土壌条件下においても、酸素消費量の多い大豆では、ソルガムと比較して、土壤酸素濃度は常に低く推移した。この事は、上述した考察の妥当性を示唆しているものと思われる。

さらに付け加えるならば、多湿条件下の黒ボク土では、非火山灰土壌と異なり土壤通気性が劣る原因として次の事が考察できる。火山灰土壌に特徴的なことは土壤の粒子が均一でかつ微少なこと。そのため著しく広大な土壤の表面積をもつため吸着する水膜(水分)が多く、土壤の孔隙間には連通性がないことが通気性を低下させるものと思われる。また、土壤表面で乾燥収縮による亀裂の発生が鉍質土壌に比較して著しく少ないことであ

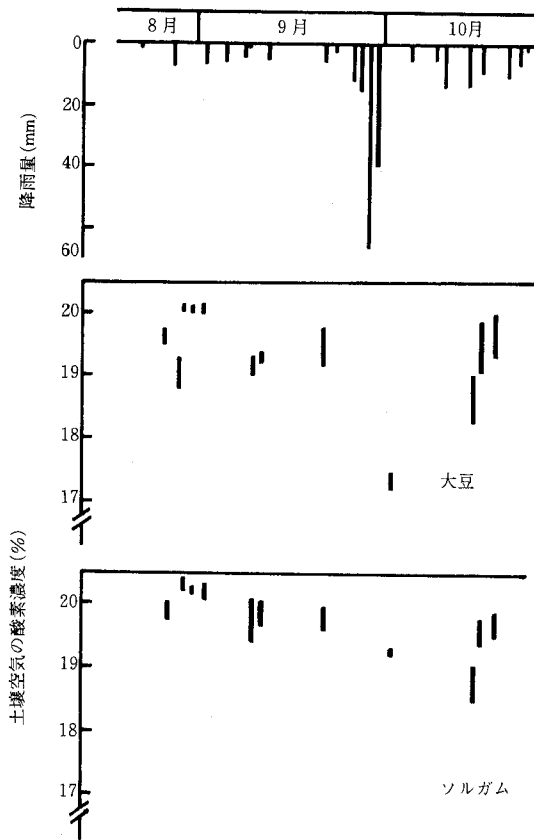


図-3 大豆およびソルガムの作付が土壤中の酸素濃度に及ぼす影響 (地下8-14cmの部位)

る。亀裂の発達が土壌通気性に及ぼす意義についての説明も必要と考えられた。

#### 4. 各種作物の出芽率とO.D.R.測定の意義

地下水位の高い条件下で酸素要求量の大きい作物(大豆)を栽培した場合、O.D.R.は生育の有効な指標になることを述べたが(表-2参照)、出芽に関しても有効な事例が報告されている。Ericksonら<sup>6)</sup>も、テンサイ、ジャガイモ、インゲンを用いて出芽実験を行ったが、O.D.R.が有効な出芽に対する指標となりうると報告している。しかし、Kaackら<sup>7)</sup>やHughesら<sup>8)</sup>は、O.D.R.よりもむしろ酸素濃度あるいは土壌硬度が出芽を支配する要因であることを示している。また、最近、Callebautら<sup>9)</sup>もテンサイの出芽にはO.D.R.の確保が必要で、その臨界点としてStolzyら<sup>10)</sup>が検討した $20 \times 10^{-8} \text{g/cm}^2 \cdot \text{min}$ という値を採用している。これらの議論の中での問題点は、出芽実験に使用した作物の種類が異なり、そのため出芽の

生理的特性(すなわち出芽に必要なO.D.R.の臨界値)が明らかにされていないことである。

この点に関して、Glinskiら<sup>11)</sup>は、出芽に必要な土壌のO.D.R.は作物の種類により相当広い範囲に及んでいること指摘した。彼らは図-4に示すように、春まき大

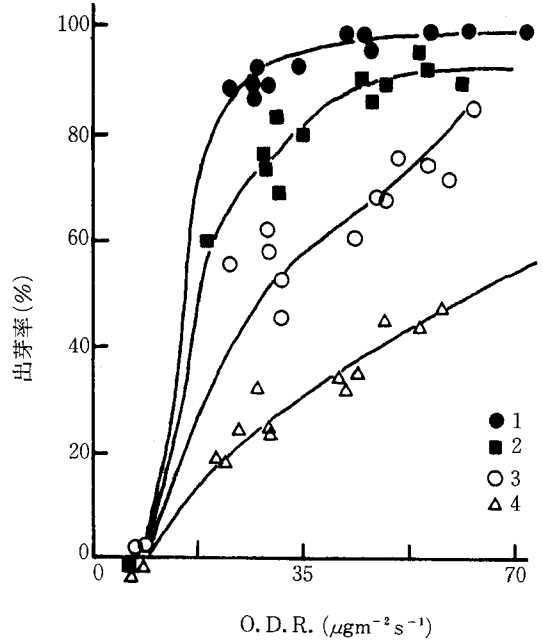


図-4 O.D.R.が穀類の出芽に及ぼす影響  
1-春まき大麦, 2-エンバク,  
3-秋まき小麦, 4-ライ麦  
(Glinskiら, 1981)

麦, エンバク, 冬まき小麦, ライ麦の4種類を供試して出芽の状態を観察した結果、50%以上の出芽を確保するために必要なO.D.R.は $7 \sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$  ( $4 \sim 40 \times 10^{-8} \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )に及ぶことを実証した。この値は、Stolzyら<sup>10)</sup>の示した値よりも、はるかに広い範囲に及んでいる。

また、Glinskiら<sup>12)</sup>は、ポーランドの代表的な3種類の土壌(砂土, レス, ローム)を供試して、土壌の種類が異なる場合においても出芽に対してO.D.R.は有効な指標になり得るか否かの検討を行った。通気性の測定には、O.D.R.以外に土壌酸素濃度、Ehも測定した。図-5には、土壌中の酸素濃度を制御するための実験系を示し、図-6, 7, 8には、土壌酸素濃度、O.D.R.およびEhと最大出芽率との関係を示した。これによると、同一種類の土壌に関しては、O.D.R., 酸素濃度、Ehと出芽率との間にかなり高い相関が認められるが、3種類の土壌を組み合わせした場合、酸素濃度のみで出芽の良否を正確に決めることは不可能である。特に、土壌がレスの場

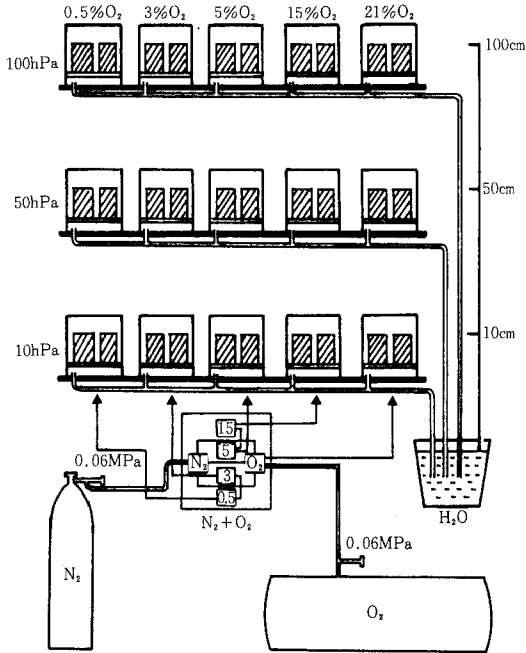


図-5 各種土壤の酸素濃度, O. D. R., Eh 設定のための装置 (Glinski ら, 1981)

合, 同一酸素濃度条件下にあってもテンサイの出芽は劣っている (図-6)。Ehについては, 少なくとも良好な

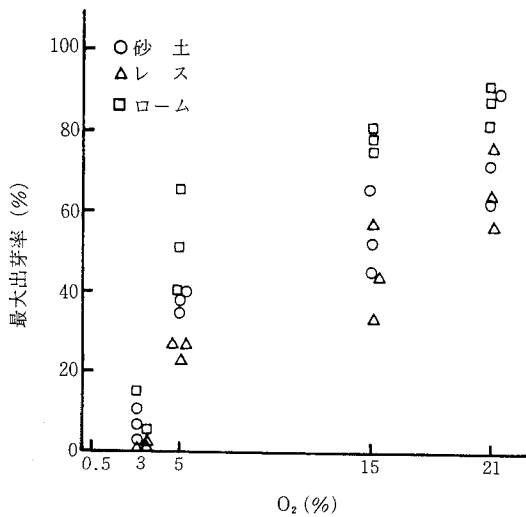


図-6 テンサイの最大出芽率と土壤酸素濃度との関係 (Glinski ら, 1981)

出芽を確保するには土壤の酸化還元電位が400mV以上必要であると指摘できる (図-8)。土壤の種類にかかわらず, 出芽の状態を詳しく把握するには, O.D.R.を測定することが最適であることが理解されよう (図-7)。

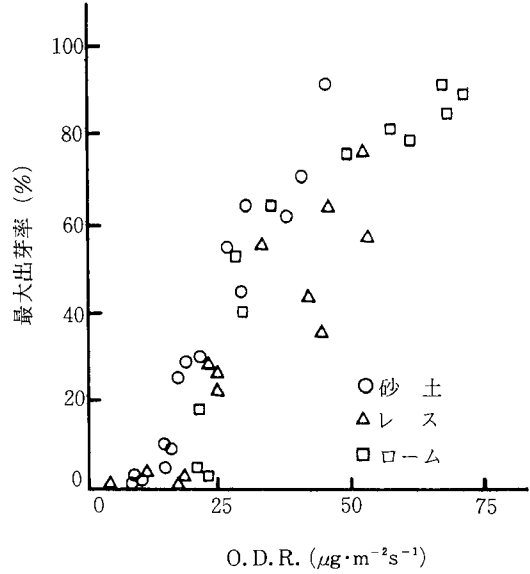


図-7 テンサイの最大出芽率とO. D. R. との関係

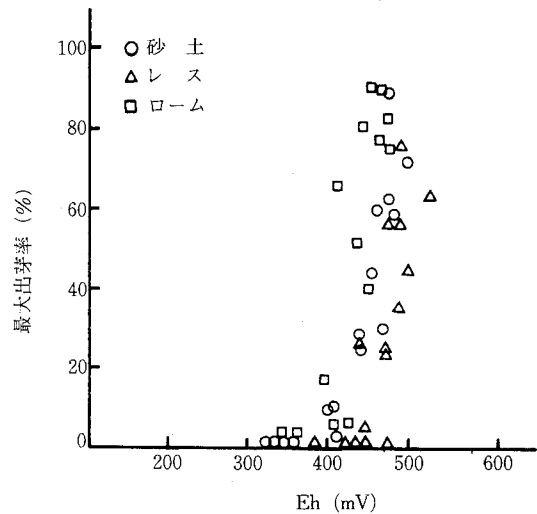


図-8 テンサイの最大出芽率とEhとの関係 (Glinski ら, 1981)

出芽だけでなく, 種々な作物の生育過程で, 良好な生育を保証する臨界O. D. R. がどのように変化するのか, 今後の研究が待たれる。

## 5. おわりに

作物培地としての土壤を考えると, これまでの土壤物理性の研究は, 主として物理的測定法だけに重点がおかれてきたように思われるが, どうであろうか。多様な作物を対象とする場合, 作物根域における生理的臨界点

をどのような物理的測定値で決めるかが重要となる。本報告では、根系の生理的特性と作物の多様性について論じてきたが、土壌中の酸素の消費を考えると、根圏微生物の存在も無視することはできない。

Trolldenier<sup>13)</sup>は、カリ欠乏土壌の根系の呼吸量はみかけ上増加することを報告している。そして、その理由として、K欠乏により作物細胞内の糖代謝が変化し、根面より糖の分泌が促された結果、根面微生物の増殖とその呼吸量が増加したことによると示唆した。土壌空気中の酸素濃度については、土壌の物理的構造や作物根系だけでなく土壌の養分状態によっても影響を受けることを感じざるを得ない。根圏環境の微視的解析が待たれる。

#### 引用文献

- 1) 久保田徹：作物培地のための土壌物理，土壌の物理性，47, 1 (1983)
- 2) 阿江教治・大山信雄・仁紫宏保：中国地域における主要類型土壌の有底枠試験による水稻生産力の比較，中国農試報告(E), 17, 57-74 (1980)
- 3) 阿江教治・仁紫宏保：ダイズ根系の酸素要求特性および水田転換畑における意義，土肥誌，54, 453-459 (1983)
- 4) Ae, N : Oxygen demand characteristics of soybean relevant to crop diversification in paddy fields, JARQ, 18, 20-26 (1984)
- 5) Tjepkema, J. D. and Yocum, C. Y. : Respiration and oxygen transport in soybean nodules, Planta (Berl.), 115, 59-72 (1973)
- 6) Erickson, A. E. and VanDoren, D. M. : The relation of plant growth and yield to soil to soil oxygen availability, Seventh Int. Soils Congress III. 428-434 (1960)
- 7) Kaack, K. and Kristensen, K. J. : Emergence and seedling growth related to oxygen content and oxygen diffusion rate in different soils, Agron. J., 59, 541-544 (1967)
- 8) Hughes, T. D., Stone, J. F., Hiffine, W. W. and Gingrich, J. R. : Effect of soil bulk density and soil water pressure on emergence of grass seedlings, Agron. J., 58, 549-553 (1966)
- 9) Callebaut, F., Magunda, M. K., Gabriels, D. and De Boodt, M. : Oxygen diffusion and redox potential as influenced by crust formation in a clay soil, The 9th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, ISTRO, 423-428 (1982)
- 10) Stolzy, L. H. and Letey, J. : III Correlation of plant response to soil oxygen diffusion rates, Hilgardia, 35, 567-576 (1964)
- 11) Glinski, J. and Stepniewski, W. : Model investigation of the effect of soil oxygenation on the emergence of cereal plants, Folia Societatis Scientiarum Lublinensis, 23, 45-51 (1981)
- 12) Glimski, J., Przywara, G. and Stepniewski, W. : The effect of oxygen conditions in the soil on the emergence of sugar beet, Roczniki Gleboznawole, 32, 61-72 (1981)
- 13) Trolldenier, G. and Rheinbaden, W. V. : Root respiration and bacterial population of roots, I. Effect of nitrogen source, potassium nutrition and aeration of roots, Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 144, 366-377 (1981)

#### 質疑応答

座長 阿江さんの御講演は、土壌の構造、物理性を評価する場合に作物の生理的特徴を考慮するとかなり多様性があり、特にエアレーションと作物根系との関係について述べられ、作物生育との関係では ODR がよい指標になることを示されました。この点につきまして御質問をお願いします。

原口 (四国農試) 一般的に考えると、黒ボク土の方がグライ土よりも孔隙も多いし、通気性もよいように思われますが、お話しでは逆のようです。ところで土壌空気中の酸素濃度はどの部分で何点とられたのでしょうか。

阿江 (中国農試) 酸素濃度は 4-5 点の平均値です。

諸遊 (農環研) ライシメータは冬期間に採取し広場に積んでおき後に順次充填した。その際深さ 20cm 分づつコンクリート槽に入れて、木製突固め器具で固めた。ち密度の目標は山中式硬度計で 18mm とした。

安田 (農環研) 黒ボク土でのダイズの生育不良は根粒による酸素消費のために、根の呼吸に必要な酸素が欠乏するためなのか、根粒の活性が低下するためなのかどちらとお考えですか。

遅沢 (農環研) 実際何%もの酸素を根粒が消費するのは疑問に思うのです。根の重さと根粒の重さの比率を教えてください。

阿江 ソルガムとダイズを比較しますと、ダイズの方がはるかに酸素濃度の低下が大きい。したがって、降雨によって土壌の通気性が悪化されるとさらにこの傾向は強くなると思う。しかし、実際の畑では根が回りへはるから根粒がどれくらいあるかはお答えできません。

## ヒドロキシアリミニウムと粘土との相互作用

和田 光 史\*

A review on interaction of clay with hydroxy-aluminum

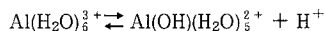
Koji WADA

Faculty of Agriculture, Kyushu University

酸化鉄が土壌の構造維持に重要な働きをしていることは、酸化鉄含量の高い土壌がしばしば良好な物理性を示すことに基づいて、古くから推論されていた(Quirk, 1978)。しかし、Krasnozem, Terra rossa, Lateritic red earthなどの赤色土(Deshrande et al. 1968),あるいは火山灰を母材とする黒ボク土(久保田, 1976; Higashi and Wada, 1977)では、構造の維持には、酸化鉄よりはむしろ“アルミナ”, 恐らくは粘土表面に存在する“ヒドロキシアリミニウム基”, アルミニウム腐植複合体の重合ヒドロキシアリミニウムが重要な役割を果たしていることが次第に明らかにされてきた。また、わが国では最近の水田の畑利用転換に当って、重粘水田土の物理性改良の一つの補助手段として、ヒドロキシアリミニウムの施用が試みられている(白石, 1979; 1980; 1982; 中野, 1983; 1984)。この小論では、まずヒドロキシアリミニウムと粘土の相互作用の化学的側面、すなわち粘土によるヒドロキシアリミニウムイオンの吸着、つぎに、ヒドロキシアリミニウムの粘土粒子凝集剤及び土粒子集合体(団粒)形成剤としての働き、最後に土壌改良剤としてのヒドロキシアリミニウムの利用について、既応の研究成果の概略を紹介し、問題点を明らかにしたい。

## 1. 粘土によるヒドロキシアリミニウムイオンの吸着

粘土鉱物、とくにモンモリロナイトの表面でのアルミニウムイオンの挙動については、土壌酸性との関連で、多くの研究がある。水溶液中ではアルミニウムイオン  $Al(H_2O)_6^{3+}$  は、



の反応式にみられるように1個のOHを含むヒドロキシアリミニウムイオンと  $H^+$  に電離し、 $pH=5.0$ の溶液中には同量の  $Al(H_2O)_6^{3+}$  と  $Al(OH)(H_2O)_5^{2+}$  が存在する。 $pH > 5.0$ の溶液では、 $pH$ の上昇とともに、後者及びこれからさらに  $H^+$  が電離して生ずる  $Al(OH)_2(H_2O)_4^+$  と、これ

らのヒドロキシアリミニウムイオンの重合によって生ずるポリマーイオン(主として  $Al_2(OH)_2(H_2O)_8^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}^{7+}$  と推定されている)が増加する。図-1に示すように、 $AlCl_3$ にOHを加えた溶液中では全

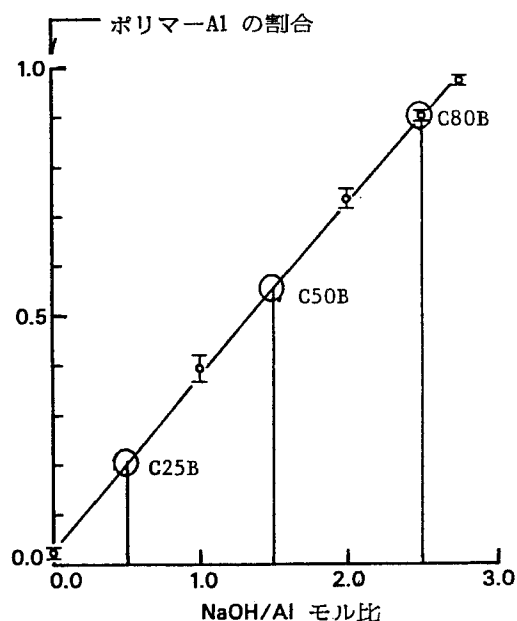


図-1 ヒドロキシアリミニウムイオンのOH/Al比と重合 (Wada and Wada, 1980)

Alに対するポリマーAlの割合はNaOH/Al比によって決定され、この比の上昇とともに直線的に増加する。すなわちNaOH/Al比=0ではおよそ0%, 2.5では90%に達する。なお図中にC25B, C50B及びC80Bと記したものは、水処理剤として市販されているヒドロキシアリミニウムの製剤(多木化学KK)である。

溶液中でのアルミニウムイオンの電離と同様、粘土によるアルミニウムイオンの吸着も、溶液中のアルミニウムイオンのOH/Al比に支配される。アルカリ、アルカリ土金属イオンに比べて、アルミニウム、とくにヒドロ

\*九州大学農学部

キシアルミニウムイオンは、粘土に選択的に吸着される。図-2はCa<sup>2+</sup>で飽和したベントナイト1gに27mg

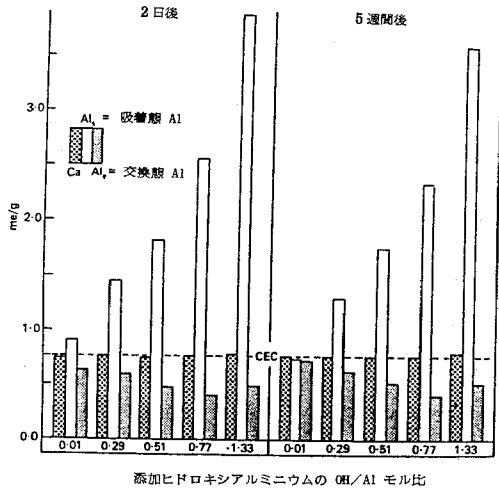


図-2 Caで飽和したベントナイトによるヒドロキシアルミニウムの吸着・脱着された交換態Caと保持された吸着態Alと交換態Alの量的関係 (Brown and Newman, 1972)

のAlの割合で、OH/Al比を異にするヒドロキシアルミニウムを加え、2日及び5週間後に、Alの吸着量(Al<sub>s</sub>)とAlの吸着に伴うCaの脱着量、並びに吸着されたAlのうち陽イオン交換反応で交換される形態で存在するものの量(Al<sub>e</sub>)を測定した結果である。Alの吸着は速やかで、Alの吸着によって粘土の交換態Caは、ほとんどすべて交換され、吸着されたAl量はOH/Al比の増加とともに増加し、吸着されたAlのうち交換態として存在するものは逆に減少している。これらのことから吸着されたヒドロキシアルミニウムイオンは、粘土の陽イオン交換基を占めるが、その大部分は非交換態となることが明らかである。

表-1は、主要粘土鉱物の種類を異にする土壤にAl(OH)<sub>3</sub><sup>+</sup>を加えてその吸着を調べた結果を示している。吸着されたヒドロキシアルミニウムイオンは添加したものに比べて明らかに高いOH/Al比を有し、吸着されたものは溶液中のものよりも電離が進み、ポリマーイオンとして存在するものの割合が高いと推定される。各土壤の陽イオン交換容量(CEC)との比較から明らかな様に、吸着されたAl(OH)<sub>3</sub><sup>+</sup>~Al(OH)<sub>2</sub><sup>2+</sup>は、赤黄色土B層粘土を除き、各土壤でその陽イオン交換基のほとんどすべてを占めている。吸着されたAlのうち交換態でなくなるものの割合(Al固定率)は、粘土鉱物の種類によって異なり、2:1型鉱物(モンモリロナイト、パーミキュライト)にくらべて、1:1型鉱物(ハロイサイト、カオリナイト)、アロフェンで高くなっている。こ

表-1 土壤あるいは粘土とヒドロキシアルミニウムとの反応 (久保田, 1976より要約)

ヒドロキシAl	水田 下層土 Mt CEC=53	赤黄色土 B層粘土 Ht, Vt 16	ラトゾル B層土 Kt 8	火山灰土 B層土 A 12
OH/Al比				
添加	1.0	1.0	1.0	1.0
吸着態	1.8	2.1	1.8	1.3
交換態	1.7	1.8	1.7	—
固定態	2.4	2.0	1.9	—
量(meq/100g)				
添加	180	46	30	35
吸着態	58	11	9	12
交換態	53	6	3	こん跡
固定態	5	5	7	—
Al固定率(モル%)	16	36	74	100

粘土鉱物略号 Mt=モンモリロナイト, Ht=ハロイサイト, Vt=パーミキュライト, Kt=カオリナイト, A=アロフェン

こで、2:1型鉱物を含む土壤でのAl固定率は、図-2の実験でみられたものよりもかなり低い、モンモリロナイトと低結晶度のカオリナイトとの間で、ヒドロキシアルミニウムとの反応に差異があることは、Hodges and Zelazny (1983 a,b) によっても報告されている。

図-2及び表-1に示した測定例に明らかなように、ヒドロキシアルミニウムは、その添加量が圃場での施用可能上限量とみられる土壤のCECを越えない範囲では、添加されたもののほとんどすべてが土壤によって吸着される。また、吸着されたヒドロキシアルミニウムは、添加したものに比べてポリマーイオンとして存在するものの割合が高く、Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>などによっては交換されず土壤中に保持され、これが次に述べる土壤中での粘土粒子の凝集、集合体形成に寄与すると推定される。

## 2. 粘土粒子の凝集剤, 集合体形成剤としてのヒドロキシアルミニウム

図-3は、van Olphen (1977) によって提案された粘土粒子のFlocculation, Deflocculation, Dispersion及び“Aggregation”の定義を模式的に示したものである。ここで各直線は、層状ケイ酸塩粘土鉱物の単位層ないしは単位層から構成された単一粒子を表わしている。この図から明らかなように、Flocculationは“Edge to face”あるいは“Edge to edge”の結合を、“Aggregation”は“Face to face”の結合を含み、前者は“Floc”の形成、後者は

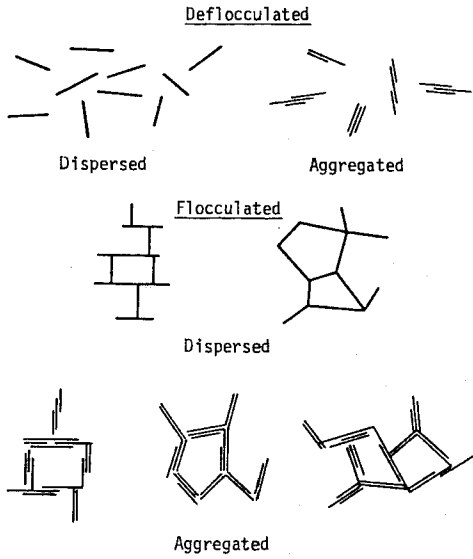


図-3 水溶液中での粘土粒子の集合状態の模式図 (van Olphen, 1977)

“Quasi-crystal”あるいは“Domain”と呼ばれるものの形成を導く。しかし、土壌学で通常 Aggregation, 集合体形成として取扱う現象は、図-3に示した“Aggregation”とは明らかに異なり、Bradfield, Rが述べたように、“Aggregation is flocculation plus” (Quirk, 1978), すなわち凝集とその結果生ずる“Floc”の安定化を含んでいる。

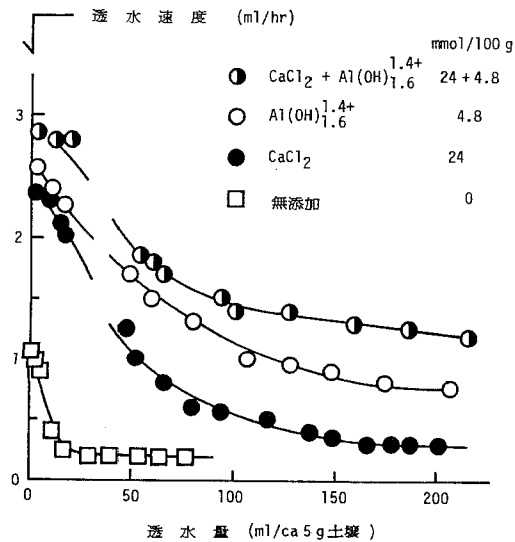


図-4 モンモリロナイトを含む重粘土の透水性に及ぼすCl<sub>2</sub>, Al(OH)<sub>1.6</sub>Cl<sub>1.4</sub>添加の影響 (Wada et al, 未発表)

モンモリロナイトを含む重粘土にヒドロキシアルミニウムを添加すれば、粘土粒子の凝集とともに、かなり安定な土粒子間の結合が起こることは、その透水性を測定することによって明らかにできる (Wada et al, 1983: 図-4)。測定は、重粘土 (<150メッシュ) 懸濁液に、Al(OH)<sub>1.6</sub>Cl<sub>1.4</sub>, CaCl<sub>2</sub>あるいは両者を図-4に記した様に添加し、無添加の試料とともに、これらをそれぞれガラスフィルター上に沈積させ、沈積した重粘土層 (約5g) を透過する水量を経時的に読みとることによって行われている。Al(OH)<sub>1.6</sub>Cl<sub>1.4</sub>あるいはCaCl<sub>2</sub>を添加した試料では、透水速度が著しく上昇している。1で述べたように、添加したAl(OH)<sub>1.6</sub><sup>4+</sup>は粘土に吸着されるが、粘土に保持されていた交換性陽イオンが陽イオン交換で溶液中に放出される。これによって生ずる電解質濃度の上昇は、粘土表面近傍の電気二重層の圧縮を通じて、粘土粒子の凝集をひき起こしたとみることができる。同様の効果はCaCl<sub>2</sub>添加によっても起こるが、Al(OH)<sub>1.6</sub>Cl<sub>1.4</sub>及びCaCl<sub>2</sub>添加後の重粘土懸濁液の電気伝導度はそれぞれ1.1及び2.3mS/cmとむしろCaCl<sub>2</sub>で高く、透水速度で見られる凝集効果とは逆になっている。これは、ヒドロキシアルミニウムが“flocculation plus”の効果を示すこと、すなわち吸着されたAl(OH)<sub>1.6</sub><sup>4+</sup>あるいはその電離によって生ずるポリマーヒドロキシアルミニウムイオンが、粘土あるいは土壌粒子間の結合に寄与していることを示している。このことは、長時間透水を続けたときに、CaCl<sub>2</sub>添加試料では透水速度が無添加の対照試料に近い水準に低下したのに、Al(OH)<sub>1.6</sub>Cl<sub>1.4</sub>添加試料ではなお高い水準を維持していたことにも明らかである。CaCl<sub>2</sub>とAl(OH)<sub>1.6</sub>Cl<sub>1.4</sub>を同時に添加したときにみられる相乗効果は、CaCl<sub>2</sub>添加によって促進される電気二重層の圧縮が、結合剤としてのヒドロキシアルミニウムの働きを助けることを示唆している。

モンモリロナイトがNa<sup>+</sup>の存在下で多量の水を含んで膨潤すること、これがモンモリロナイトを含む土壌の物理性に悪影響を及ぼすことはよく知られている。このモンモリロナイトの膨潤では、そのケイ酸塩単位層間に水が多分子層を形成して取り込まれる。モンモリロナイトの表面、とくにその層間に吸着されたヒドロキシアルミニウムは、モンモリロナイトのCECを減少させるだけでなく、その層間和、膨潤を妨げる働きをする (Kidder and Reed, 1972; El Rayah and Rowell, 1973)。表-2はこれを実証する測定例の一つである。

ヒドロキシアルミニウムによる粘土粒子の結合は、その添加前後に試料を乾燥することによって著しく促進される (Wada et al, 1983)。図-5は、図-4に示したモンモリロナイト質重粘土について、ヒドロキシアルミニウム添加後の乾燥がその透水性促進に及ぼす効果を調べ

表-2 モンモリロナイト<sup>1)</sup>の膨潤に及ぼすヒドロキシア  
ルミニウム添加の効果 (Kidder and Reed, 1972)

ヒドロキシア ルミニウム OH/Al比	添加量 meqAl/100g	CEC meq/100g	膨潤量 gH <sub>2</sub> O/g	
			Rowell <sup>2)</sup>	Warkentin <sup>3)</sup>
	0	131	30.20	12.00
1.5	200	96	4.40	5.10
1.5	800	61	0.80	3.50
1.5	1,600	0	0.43	—
2.7	200	112	6.80	3.50
2.7	800	47	0.71	—
2.7	1,600	4	0.64	—

- 1) Camargo ベントナイト (<0.2 μm)
- 2) Rowell 法; 5 × 10<sup>-3</sup> N NaCl 中での膨潤量
- 3) Warkentin 法; 10<sup>-4</sup> N NaCl, 0.01 気圧での膨潤量

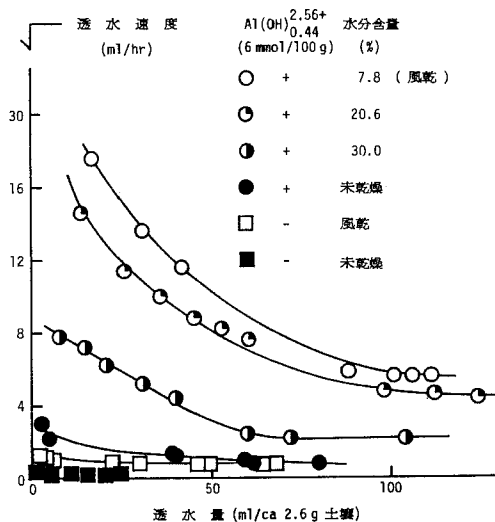


図-5 モンモリロナイトを含む重粘土の透水性に  
及ぼす Al(OH)<sub>0.44</sub> Cl<sub>2.56</sub> 添加と乾燥の影響  
(Mahmoud et al, 未発表)

た結果である。この実験では、重粘土試料は懸濁液の状態  
で Al(OH)<sub>0.44</sub>Cl<sub>2.56</sub> と反応させ、ガラスフィルター上  
に沈積、それぞれ図-5 に示した水分含量になる迄大気  
中に放置し、その後一定の条件で水中に懸濁させてガラ  
スフィルター上に再沈積させたものである。これについ  
て、透水速度が測定されている。また、別に行なった水  
分保持量の測定から、この重粘土試料は相対湿度93%  
(pF=5) で21~23%の水分を保持することが明らか  
にされている。図-5 及び水分保持量測定の結果は、恐  
らく永久しおれ点以上の強い乾燥が、ヒドロキシア  
ルミニウムによる土粒子間結合を著しく強めることを示  
している。いま試料が50%のモンモリロナイトを含み、こ  
れのみが水分保持に寄与していると仮定すれば、この様  
な結合の強化は、モンモリロナイト表面上に単ないし3分

子層程度の水膜が存在するとき起こると推定される。  
ヒドロキシアルミニウム無添加の試料にも、風乾による  
透水速度の増加が認められているが、その程度は添加  
試料に比べれば著しく小さい。また、乾燥程度を異にす  
る同じ重粘土試料に、ヒドロキシアルミニウム水溶液を  
加えたときにも、その効果はやや小さいが、明らかに乾  
燥の効果が認められたことは、その施用法、反応機構を  
考える上で注目に値する。

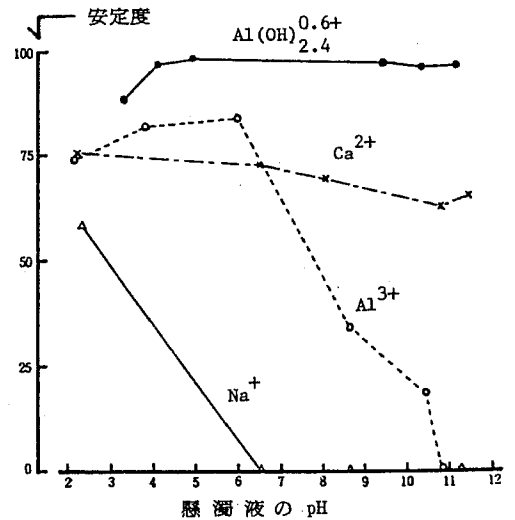


図-6 希塩酸-アンモニア水中での各陽イオンで  
飽和したモンモリロナイト粘土風乾試料の  
安定度 (久保田, 1976)

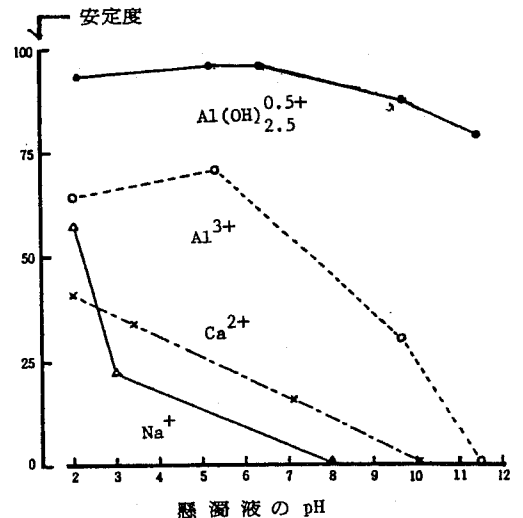


図-7 希塩酸-アンモニア水中での各陽イオンで  
飽和したハロイサイト粘土風乾試料の安定  
度 (久保田, 1976)



図-6及び図-7は、各陽イオンで飽和したモンモリロナイト及びハロサイト風乾試料(粒径1~4mm)について、pHを異にする水溶液中で振とうして0.1mm以上の集合体の残存率(安定度)を測定したものである。ここで、それぞれの湿潤粘土ペーストは分散条件を与れば容易に分散するので、風乾が安定な粘土集合体の形成に寄与し、その機構としては、図-8に模式的に示したような“Olation”が推定されている(久保田, 1976)。

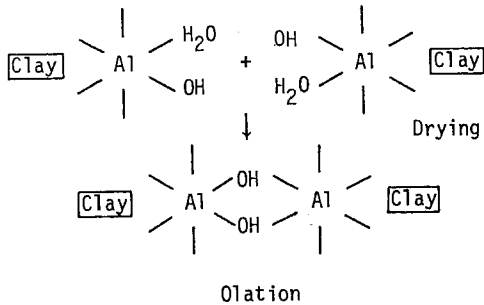


図-8 吸着ヒドロキシアリミニウムの“Olation”による粘土粒子間の結合

### 3. 土壤改良剤としてのヒドロキシアリミニウムの利用

ヒドロキシアリミニウムを圃場、あるいは室内実験で

重粘土に添加したときに、多くの場合に、耐水性土粒子集合体の形成、透水性の改善、乾燥土塊の圧碎抵抗の減少、碎土率の増加など、その物理性改良効果が認められている(中野, 1983; 1984; 白石, 1979; 1980; 1982; 土壤改良剤研究会1981; 1983)。一例として表-3, 4及び5には、白石(1982)によって行われたヒドロキシアリミニウム施用枠試験(1m<sup>2</sup>×1m)の結果を要約して示した。ここで用いられた和鹿島土壌は粘土含量が52%, CEC 40meq/100gのモンモリロナイト質重粘土、筑後土壌は粘土含量が10%, CEC 12meq/100gの埴質壤土でカオリナイト、クロライトを含んでいる。表-3の団粒(径0.1mm以上)は、その大部分が径0.5mm以上で、ヒドロキシアリミニウムの施用によって明らかに増加し、その効果は4年間の作物栽培によっても低下していない。この耐水性団粒の増加は、土壌のコンシステンシーに関してはその性限界の上昇、易耕性の指標値として提案されているその性限界/pF1.8水分比(中野, 1978)の上昇をもたらしている。この他、和鹿島土壌では仮比重の低下、粗孔げき(pF1.6相当以上)率の増加、透水係数の著しい増加が見られているが、筑後土壌ではこれらの効果は明らかでない。両土壌の間で見られた差異は、ヒドロキシアリミニウムの施用によって起こる耐水性団粒の増加が土壌の構造発達、維持に及ぼす効果が、粗粒部分が少なくモンモリロナイトを多く含む和鹿島土壌で大きく、粗粒部分が多くカオリナイト、クロライトを含む筑

表-3 土壤の物理性に及ぼすヒドロキシアリミニウム施用の効果(1)(白石, 1982)

ヒドロキシAl 施用量 (%対CEC)	土				壤			
	和鹿島	和鹿島	和鹿島	和鹿島	筑後	筑後	筑後	筑後
	団粒含量 (%)	仮比重	粗孔げき率 (%)	圧碎抵抗 (kg/cm <sup>2</sup> )	団粒含量 (%)	仮比重	粗孔げき率 (%)	圧碎抵抗 (kg/cm <sup>2</sup> )
0	31	0.8	3	53	23	1.2	3	18
25	35	0.8	8	29	24	1.2	3	15
50	44	0.7	10	27	32	1.2	3	16
75	49	0.7	13	19	34	1.2	4	15

ヒドロキシアリミニウム施用一稲・小麦各4作跡地

表-4 土壤の物理性に及ぼすヒドロキシアリミニウム施用の効果(2)(白石, 1982)

ヒドロキシAl 施用量 (%対CEC)	土			壤		
	和鹿島	和鹿島	和鹿島	筑後	筑後	筑後
	その性限界 (%)	その性限界/pF1.8水分	透水係数 (cm/sec)	その性限界 (%)	その性限界/pF1.8水分	透水係数 (cm/sec)
0	46	0.57	2×10 <sup>-5</sup>	29	0.74	5×10 <sup>-4</sup>
25	47	0.64	2×10 <sup>-4</sup>	32	0.79	6×10 <sup>-4</sup>
50	52	0.68	5×10 <sup>-4</sup>	33	0.81	4×10 <sup>-4</sup>
75	60	0.81	2×10 <sup>-3</sup>	37	0.89	5×10 <sup>-4</sup>

ヒドロキシアリミニウム施用一稲・小麦各1作跡地

表-5 土壌の摩擦及びせん断抵抗値に及ぼすヒドロキシャルミニウム施用の効果 (白石, 1982)

土 壌	ヒドロキシ Al 施用量 (%対CEC)	摩 擦		せん断		応力0.5kg/cm <sup>2</sup> の場合	
		付着力 (kg/m <sup>2</sup> )	外部摩擦 角(度)	凝集力 (kg/m <sup>2</sup> )	内部摩擦 角(度)	摩擦抵抗 (kg/cm <sup>2</sup> )	せん断抵抗 (kg/cm <sup>2</sup> )
和 鹿 島	0	0.01	18.5	0.31	32.0	0.15	0.62
	25	0.06	16.2	0.31	36.7	0.21	0.68
	50	0.09	14.8	0.35	37.1	0.23	0.73
	75	0.10	13.5	0.35	38.3	0.25	0.76
筑 後	0	0.05	22.7	0.18	48.2	0.26	0.74
	25	0.05	21.3	0.22	46.4	0.25	0.76
	50	0.05	21.3	0.23	45.8	0.25	0.76
	75	0.06	21.8	0.25	45.3	0.26	0.76

ヒドロキシャルミニウム施用一稲・小麦各4作跡地

後土壌では小さいことを示唆している。両土壌の摩擦及びせん断抵抗値に及ぼすヒドロキシャルミニウム施用の効果の差異(表-5)も、基本的には同じ様な考えで説明されている(白石, 1982)。

ヒドロキシャルミニウムの施用は、交換性塩基の溶脱、酸性の増加、土壌溶液の電解質濃度の上昇、CECの減少を招くので、施用後に灌水、石灰、苦土などの添加を要することが難点である。上述の枠試験では、1976年11月にヒドロキシャルミニウムを施用して、小麦1作後の1977年6月に石灰、苦土を施用して、その後水稻、小麦を栽培し、その収量には区間による大きな差異は認められていない。表-6に示す様に、土壌のpHはヒドロキシャルミニウム施用区でむしろ高くなっているが、これは石灰、苦土の施用の結果である。ここで注目されるのはCECの低下が見られないことで、添加時に土壌の陽イオン交換基を占めたヒドロキシャルミニウムイオンが形態を変えて、表-3, 4, 5に示した効果の発現に寄与していることが窺われる。土壌のアルミニウムの形態別定量結果は、添加したヒドロキシャルミニウムのかなりの部分が、有機物と結合するとともに、非結晶質ケイ酸アルミニウムとして存在することを示唆している(白石, 1982)。表-6にみられる和鹿島土壌のヒドロキシ

アルミニウム添加区での全窒素含量の増加は、全炭素含量の増加と有機物窒素の無機化抑制を伴うことが明らかにされている。これは、黒ボク土の腐植集積と同様、ヒドロキシャルミニウムとの結合が腐植の微生物による分解を抑制することを示している。

ヒドロキシャルミニウムの施用が粘土、とくにモンモリロナイト粒子の凝集、集合体形成に有効な物質として利用できることは明らかである。その具体的な施用法、施用後の除塩、酸性中和などについても一定の方式が提案されている。しかし、粘土によるヒドロキシャルミニウムイオンの吸着に関しては、これを含むイオン交換平衡、その吸着によって生ずる粘土粒子の正負荷電特性の変化、透水あるいは酸性中和処理による吸着されたヒドロキシャルミニウムの形態変化などについて、さらに研究が必要である。また、ヒドロキシャルミニウムによる粘土粒子間結合とその安定性については、粘土鉱物の種類によっては、ヒドロキシャルミニウムの添加が逆に分散を招くこともあり、今後の研究課題の一つである。ヒドロキシャルミニウムの施用では、土壌の化学性への悪影響と経済的負担の大きいことが難点である。表-3及び4に示した和鹿島土壌に加えられたヒドロキシャルミニウムは7~20mmol/100gである(白石, 1982)。10a

表-6 土壌の化学的性質に及ぼすヒドロキシャルミニウム施用の効果 (白石, 1982)

ヒドロキシAl 施用量 (%対CEC)	土				壤			
	pH (KCl)	CEC (meq/100g)	リン酸 吸収係数	全窒素 (%)	pH (KCl)	CEC (meq/100g)	リン酸 吸収係数	全窒素 (%)
0	5.1	39	1360	0.178	5.0	17	880	0.200
25	5.2	41	1380	0.191	5.2	18	860	0.205
50	5.4	42	1470	0.195	5.2	17	860	0.200
75	5.4	43	1560	0.202	5.4	18	930	0.202

ヒドロキシャルミニウム施用一稲・小麦各4作跡地

当りの作土の重量を100tonとして計算すれば、これは市販の水処理凝集剤として使用されているヒドロキシアルミニウム剤原液（島崎・矢野，1981）3.3~10ton/10a（1tonの価格は¥30,000~45,000）の施用に相当する。今後、施用法の工夫、有機物資材との組合せなどでヒドロキシアルミニウムの施用量をできるだけ低く抑えることが望ましく、利用面では暗渠の埋戻し、その他の工事での重粘土下層土の改良、アルカリ土壌の物理性、化学性改良などの利用の可能性が検討に値すると考えられる。

### 引用文献

- Brown, G. and Newman, A. C. D. 1973. *J. Soil Sci.* 24 : 339-353.
- Desphande, T. L., Greenland, D. J. and Quirk, J. P. 1968. *J. Soil Sci.* 19 : 108-122.
- 土壤改良剤研究会. 1981. ヒドロキシアルミニウムの利用に関する試験成績（第1集）pp. 178. 九州土壤肥料研究会, 土壤改良剤研究会, 筑後市.
- 土壤改良剤研究会. 1983. ヒドロキシアルミニウムの利用に関する試験成績（第2集）pp. 139. 九州土壤肥料研究会, 土壤改良剤研究会, 筑後市.
- El Rayah, H. M. E. and Rowell, D. L. 1973. *J. Soil Sci.* 24 : 137-144.
- Higashi, T. and Wada, K. 1977. *J. Soil Sci.* 28 : 653-663.
- Hodges, S. C. and Zelazny, L. W. 1983a *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47 : 206-212.
- Hodges, S. C. and Zelazny, L.W. 1983b. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47 : 221-225.
- Kidder, G. and Reed, L. W. 1972. *Clays Clay minerals* 20 : 13-20.
- 久保田徹. 1976. 農技研報告 B 28 : 2-74.
- 中野啓三. 1978. 北陸農試報告21 : 63-91.
- 中野啓三. 1983. 北陸農試報告25 : 87-108.
- 中野啓三. 1984. 北陸農試報告26 : 97-113.
- Quirk, J. P. 1978. In : *Modification of Soil Structure*, ed. by W. W. Emerson, R. D. Bond and A. R. Dexter, John Wiley and Sons, Chichester, 3-16.
- 島崎英紀・矢野保孝. 1981. ヒドロキシアルミニウムの利用に関する試験成績（第1集）, 土壤改良剤研究会, 173-175.
- 白石勝恵. 1979. 九州農試報告20 : 257-281.
- 白石勝恵. 1980. 九州農試報告20 : 347-372.
- 白石勝恵. 1982. 九州農試報告22 : 203-257.
- van Olphen, H. 1977. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, John Wiley and Sons, New York. pp.318.
- Wada, K., Tsumori, Y., Nitawaki, Y. and Egashira, K. 1983. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29 : 313-322.
- Wada, S. and Wada, K. 1980. *J. Soil Sci.* 31 : 457-467.

### 質疑応答

座長 ヒドロキシアルミニウムの施用に関して粘土によるヒドロキシアルミニウムイオンの吸着、特に選択的な吸着について、ヒドロキシアルミニウムの粘土粒子凝集剤・集合体形成剤としての働き、さらに乾燥が粘土粒子結合に及ぼす効果のお話でしたが、御質問をお願いします。

石黒（農士試） ヒドロキシアルミニウムのポリマーイオンの重合度の違いが、粘土との相互作用に及ぼす影響について教えてください。また、重合度の低いポリマーが粘土粒子に吸着し、それが更に重合していくと考えてよいでしょうか。

和田（九州大） 粘土との相互作用は、例えば吸着の面で見ると、モノマーのものに比べるとポリマーになっているものは非常に吸着率がよくなります。これは、普通の陽イオン交換のルールから申しますとおかしく、ポリマーになっているものの荷電は、一つのイオンとしてはモノマーのものより低い、ですから吸着率は低くなりそうですが、現実には高くなっている。このことはおそらくイオンが大きくて粘土表面との間にファンデルワールス力的な相互作用が強く働いたこと、さらにエントロピー効果によると考えられます。そのようにくっついたものの一部が最後に申し上げたオーレションといったようなことで粘土粒子を強固に結びつけるのではないかと思います。

重合については本当はよくわからないのです。ただ、久保田さんのデータがよい例だと思いますが、溶液にOH含量の低いものを添加して、吸着されたものを測ると確かにOH含量は上っているわけです。これは、その時に選択的に溶液中からOH含量の高いものをひろいあげその後さらに解離が進んだのか、あるいは吸着されたものが、加水分解によって水のOHをさらに取りこんでいくのかの二つの考え方があると思いますが、現在までのところ後者の方が多いようです。吸着された状態でOHを取りこむとすると並行して重合もすすむのではないかと思います。

赤江（滋賀短大） ヒドロキシアルミニウムが選択的に粘土に吸着される機構のうち、エントロピー効果について説明して下さい。

和田 粘土表面の陽イオンに配位した、水分子の除去によって系全体としてエントロピーが高くなることから、ヒドロキシアルミニウムポリマーの吸着に有利に働くと

説明されています。

須藤（茨城大） ヒドロキシアリミニウムと粘土の関係の中で、ギブサイトの位置づけはどうなりますか。

和田 スメクタイトに多量のヒドロキシアリミニウムを添加しますと、スメクタイト層間の全部にヒドロキシアリミニウムが入ってしまう状態を実験室ではつくるこ

とができます。しかしその状態は安定ではなくて、少し時間がたつと今度は層間からはずれて溶液中にギブサイトの結晶ができてきます。ギブサイトの生成は、一つはヒドロキシアリミニウムの添加量が増すこと、もう一つは層間に取りこまれて一度配位した場合に生成しやすいといわれています。

## 粘質土壌の易耕性からみた土壌構造の評価法

中 野 啓 三\*

Structural evaluation of clayey soils by ratio of plastic  
limit to soil moisture content (pF 1.8)

Keizo NAKANO

Shikoku National Agricultural Experiment Station

ペーパー<sup>1)</sup>によれば、易耕性 (Soil tilth) は植物の生育に関係する土の物理的性質を指し、植物の生育に適した土の物理的條件は、普通、最小の労力で最良の粒団化が得られるように耕されること、すなわち、耕耘し易いということになるとされている。

ところで、耕耘時の土壌水分は耕耘作業の難易だけでなく、その後の土壌条件にも影響する。特に、多湿条件下にある重粘土水田を畑に転換利用する場合、機械による耕起、砕土作業に支障をきたすだけでなく、作業に伴う繰り返しによって土壌構造の劣化を招く。このために、播種などの作業が困難となるばかりでなく、作物の生育にも悪影響を及ぼすことは良くみられるところである。したがって、このような重粘土地帯で畑作物の安定した収量を確保するには、土壌の易耕性及び土壌構造の安定性を把握し、その土壌条件に応じた改善策の選択が必要である。

ここでは、これらの現象を統一的に評価する指標として、土壌のコンシステンシーと水分特性の関連で、塑性限界/pF 1.8-含水比をとりあげた。

## 1. 土壌構造の安定性

Boekelら<sup>2)3)</sup>は重粘土土壌の構造が時間の経過によって大きく変化することから、圃場における土壌構造の劣化が、主に湿潤状態での踏圧や重力などの機械的な力による塑性変形にあることを挙げた。さらに、このような土壌の構造は孔隙の量や分布などの1時点の測定だけではなく、構造の安定性についての要因を加えることの必要性を強調した。そして、アッターベルグ限界の塑性限界よりも多水分側において土壌が塑性変形をすると考え、土壌の塑性変形を起さなくなる限界水分点としての塑性限界が圃場条件での水分安定点である圃場含水量に対してどういう位置にあるのかで、外部から加えられた機械的な力に対する構造維持力が推定できるとした。すなわ

ち、塑性限界が圃場含水量に対比して大きい土壌ほど外力に対して安定な状態にあると考え、この目的のために吸引法で測定された pF 2.0-含水比が圃場含水量の代りに使用された。

北陸地域では冬期間圃場が積雪下となるため、作土は過湿状態にあり、加えて積雪の荷重下で経過する。耕耘や作物の栽培によって構造を持っていた作土はこの期間に大きな孔隙を減じ、より低次の構造へと移行する。表-1は北陸農試構内にある細粒強グライ土の田川統に属

表-1 塑性限界/pF1.8-含水比に対する改良資材の影響 (畑転換2年目収穫期) (1981)

処理	項目	塑性限界	pF1.8-含水比 (%)	塑性限界/pF1.8-含水比
無	施用	39.1	45.4	0.86
稲	わら	44.9	51.0	0.87
P	A C	45.3	45.3	1.00
PAC	稲わら	47.3	52.3	0.91

(注) 稲 わら : 60kg/a

P A C : ポリ塩化アルミニウム, CECの30%相当量

PAC・稲わら : 両者の併用

する水田の畑転換に際して、作土の物理性改善のための資材施用と塑性限界/pF 1.8-含水比との関係を、表-2は作土の三相分布に対する資材施用の影響を示したものである。表-2にみられるように、粗孔隙 (pF 1.5における気相) は各区とも融雪後である畑転換3年目耕起前が積雪前の2年目収穫期より小さく、冬期間に減少がみられた。この粗孔隙の減少割合は塑性限界/pF 1.8-含水比が1.00と大きかった PAC (ポリ塩化アルミニウム) 区で16%と他区よりも小さく、同区において土壌構造の安定性の高いことを示している。さらに、転換3年目は播種後の6月から7月初めまでの間に降雨日が多く、トウモロコシは湿害を受けて全体として生育の劣った年であった。この転換3年目における土壌水分の推移は、図

\* 四国農業試験所

表-2 三相分布に対する資材施用の影響(転換畑)  
(1980-1981)

年次	項目		乾燥 密度	三相分布(pF1.5)%		
	処理			固相	液相	気相
2年目 (収穫期)	無 施 用		1.01	39.0	46.4	14.6
	稲 わ ら		0.90	35.7	46.2	18.1
	P A C		0.92	36.2	43.0	20.8
	P A C · 稲 わ ら		0.85	34.3	46.1	19.6
3年目 (耕起前)	無 施 用		1.03	40.5	47.9	11.6
	稲 わ ら		0.91	36.5	51.6	11.9
	P A C		0.92	36.8	45.7	17.5
	P A C · 稲 わ ら		0.88	35.4	52.8	11.8
3年目 (収穫期)	無 施 用		1.04	41.1	44.2	14.7
	稲 わ ら		0.96	38.8	46.2	15.0
	P A C		0.90	35.6	40.4	24.0
	P A C · 稲 わ ら		0.93	37.3	44.5	18.2

は湿害が比較的軽く、表-3にみられるように、その生育は塑性限界/pF 1.8-含水比の小さい区よりも優った。

表-3 トウモロコシの生育及び収量に対する資材施用の効果 (3年目) (1981)

項目	生育調査(7月13日)		収量(生草kg/)
	草 丈(cm)	1株乾物重(g)	
無 施 用	114	30.3	329
稲 わ ら	110	18.2	250
P A C	141	47.6	376
PAC · 稲 わ ら	136	41.4	361

このように、塑性限界/pF 1.8-含水比の大きな土壌は塑性変形を起さなくなる水分点である塑性限界までの水分低下が速かであるため、土壌構造の安定性が高いと云える。そして、塑性限界/pF 1.8-含水比の増大は土壌構造安定性の改善を通じて、作物の湿害回避、または、軽減に役立つと考えられる。

## 2. 低湿重粘土水田の地耐力

久保田<sup>4)</sup>は重粘土水田土壌の地耐力診断のための土壌構造指数として、塑性限界/pF 2.0-含水比が役立つことを明らかにした。すなわち、土壌の硬さに関する性質を数量化して表わすには、土壌硬度は水分条件によって変動するために土壌間の比較が難しい。水分条件を消去する必要性から、pF 2.0の水分状態でのコーンの貫入が塑性変形の難易と関係があるものと考え、湿潤重粘土土壌の土壌硬度と塑性限界/pF 2.0-含水比との関係の検討がなされた。その結果、図-2にみられるように、pF 2.0

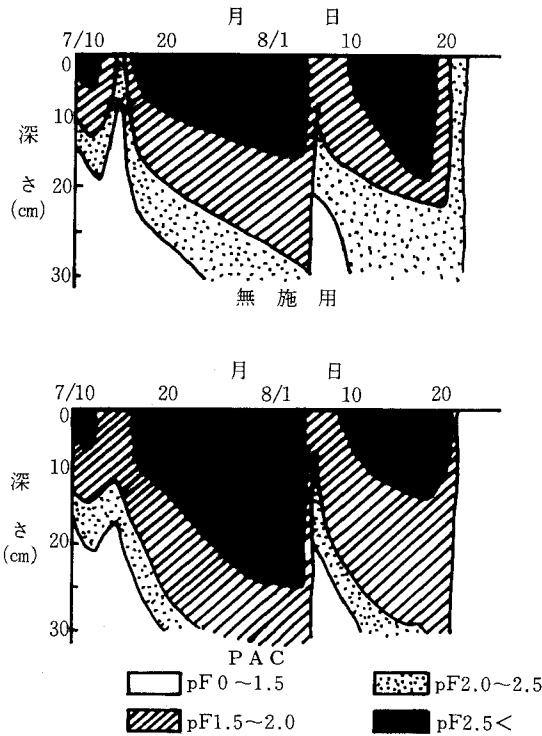


図-1 改良資材施用と土壌水分(pF)との関係  
(3年目, 1981)

図-1にみられるように、塑性限界/pF 1.8-含水比の大きいPAC区が同比の小さい区に比べて高いpF値で推移しており、降雨後にpF値の上昇も速やかであった。また、PAC区では粗孔隙がトウモロコシの生育期間を通じて20%以上を維持していることもあり、トウモロコシ

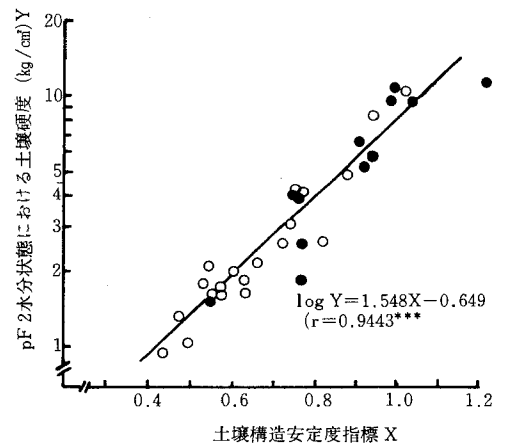


図-2 土壌硬度と土壌構造安定度指標の関係(久保田)

表-4 水稻の無湛水栽培による土壌物理性の推移 (1970)

処 理	項 目		液性限界 乾土/生土
	塑性限界	pF1.8含水比(%)	
慣行水管理栽培	39.0	66.4	0.79
無湛水栽培	38.9	51.8	0.83
無湛水栽培+弾丸暗きよ	40.7	48.3	0.82

の水分状態での土壌硬度が塑性限界/pF 2.0-含水比との間で高い相関のあることを認め、土壌の水分条件に依存しない硬さに関する固有の性質を、塑性限界/pF 2.0-含水比によって数量化できると結論した。この指標は、①コーン貫入では測定しにくい攪乱された作土層、堅密層をよく測定できる。②土壌の耕しやすさ、土壌構造発達程度との関係をもっているなどの利点があげられた。

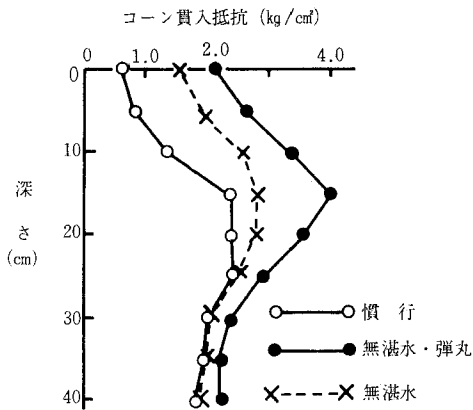


図-3 無湛水栽培が土壌硬度におよぼす効果 (1970)

筆者は低湿重粘土水田の土層改良を図るために、水稻を湛水移植・活着後に無湛水で栽培した。無湛水栽培と塑性限界/pF 1.8-含水比及び土壌硬度との関係を表-4、図-3に示した。水稻の無湛水栽培によって作土の塑性限界/pF 1.8-含水比が大きくなるとともに、土壌硬度の増大は作土だけでなく、作土下の土層にもおよび、農業機械の支持と走行に必要な地耐力の改善がみられた。このように、低湿田における作土の塑性限界/pF 1.8-含水比は作土下土層の状態をも反映していると考えられる。

### 3. 易 耕 性

久保田<sup>5)</sup>は Boekel の土壌構造指数を圃場における耕耘可能状態の安定性の推定へと発展させた。塑性限界を耕起可能な水分点とし、塑性限界が圃場含水量に比べて大きい土壌、すなわち、塑性限界/pF 1.8-含水比が大きい土壌ほど耕耘の支持力が大きく、より多量の降雨によ

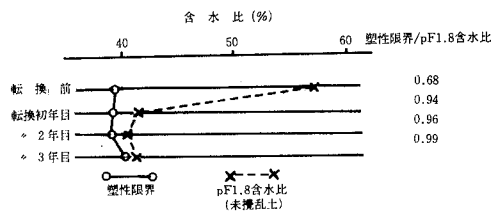


図-4 畑転換に伴う作土の塑性限界と pF1.8含水比との関係 (1971~1973)

ってはじめて耕耘不能の水分域に達し、また、降雨後に速やかに耕耘可能な水分域になると考えた。また、久津那ら<sup>6)</sup>は転換畑と隣接水田の土壌について、易耕性を塑性限界と pF 1.7-含水比との関係から考察し、易耕性の判断に対してその有効性を認めている。その結果を表-5に示した。

図-4は田川統に属する水田を畑転換した圃場について、畑転換に伴う作土の塑性限界と pF 1.8-含水比の関係を示したものである。易耕性が劣って畑への転換が困難である強グライ土の重粘土水田は pF 1.8-含水比が塑性限界に比べてかなり大きい特徴を持っている。ところで、降雨後の過剰水は短時間に排除され、土壌水分は圃場含水量にまで低下する。しかし、それ以上の土壌乾燥は主として蒸発散によらねばならず、急速には進まない。圃場含水量が塑性限界に比べて非常に大きい、すなわち塑性限界/pF 1.8-含水比の小さい土壌は、慣行の耕耘ができる水分状態になるまで土壌水分を低下させるには長時間が必要である。当然、このような状態にある圃場は土壌の乾燥を待っている適期に播種ができないので、過湿状態で耕耘しなければならず、機械作業や土壌管理が困難となる。一方、転換2年目以降の塑性限界/pF 1.8-含水比が大きくなった圃場は降雨後の土壌乾燥が速かになり、また、比較的低い pF においても耕耘できるようになるなど、機械の稼働日数に対しても有利に働くと云える。

山崎<sup>7)</sup>が前記試験の隣接圃場で実施した転換畑における耕耘方法の試験から、耕耘時における土壌含水比の推移についての年次変化を図-5に、土壌の含水比と碎土率との関係の年次変化を図-6に示した。春耕転前の土壌含水比は初年目では49~55%であり、塑性限界より遙

表-5 塑性限界と圃場容水量 (久津那ら)

項 目	転 換 畑			水 田			
	(A) 塑性限界	(B) pF1.7 含水比	A/B	(A) 塑性限界	(B) pF1.7 含水比	A/B	
灰 色 台 地 土	34.8	40.1	0.87	32.2	41.8	0.77	
	37.1	46.4	0.80	32.7	43.8	0.75	
	44.0	48.6	0.91	32.7	43.8	0.75	
灰 色 低 地 土	30.9	31.4	0.98	30.0	34.3	0.87	
	35.9	42.6	0.84	34.7	43.9	0.79	
	40.6	48.0	0.85	37.6	47.9	0.78	
灰 色 低 地 土	37.5	40.9	0.92	35.7	39.8	0.89	
	40.9	47.8	0.86	38.3	46.3	0.83	
	40.5	47.8	0.85	40.3	53.6	0.75	
グ ラ イ 土	31.0	36.7	0.84	29.9	37.3	0.80	
	29.6	35.7	0.83	29.2	40.8	0.72	
	(高)	34.0	45.9	0.74	31.2	43.2	0.72
泥 炭 土	(低)	31.7	39.1	0.81	32.1	41.6	0.77
	(低)	41.2	44.2	0.93	36.2	43.7	0.83
	(低)	42.3	50.9	0.83	37.2	42.6	0.87
	(低)	33.5	38.3	0.87	28.4	33.1	0.86
多 湿 黒 ボ ク 土	34.5	44.0	0.78	33.6	51.5	0.65	

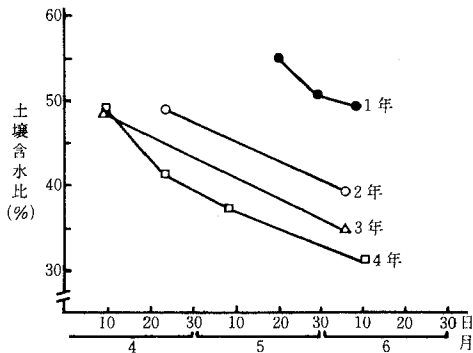
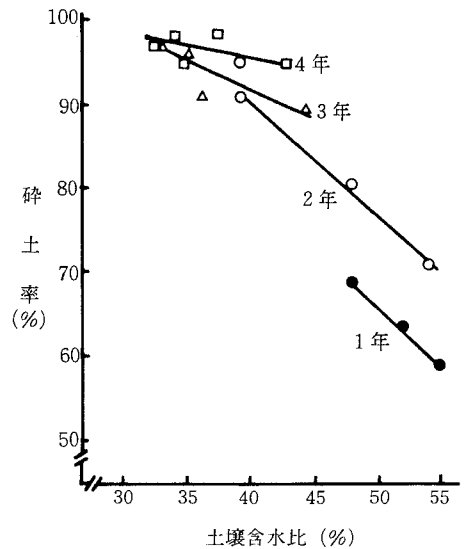


図-5 土壌含水比の年次変化(山崎, 1971~1974)

かに大きかったが、転換2年目以降では土壌乾燥が速かに進むようになり、この傾向は年次の経過とともに速かとなった。したがって、転換初年目の耕耘は微速装置つきトラクタに多軸ロータリを使用し、耕耘ピッチ1.1cmで行ったにもかかわらず、碎土率は70%を得ることができなかった。しかし、転換2年目以降では碎土率は次第に向上し、3年目以降は普通のトラクタでの作業が可能となるなど、易耕性の改善が進んだ。

このように、塑性限界/pF 1.8-含水比が小さく、易耕性の劣っている低湿重粘土水田も、畑転換後、年次の経過によって畑地化が進み、同比が大きくなるとともに、耕耘は容易となり、また、畑転換に伴う孔隙量の推移及

図-6 土壌含水比と碎土率(山崎, 1971~1974)  
(耕耘ピッチ1.1cm, 10cm耕)

びトウモロコシの収量の推移を示した表-6, 7にみられるように、土壌物理性が改善され、トウモロコシも普通畑と同様の安定した収量が得られるようになる。

なお、筆者<sup>2)</sup>は塑性限界/pF 1.8-含水比を転換畑土壌における畑地化の程度を示す指標として有効であることを認めたが、ここでは重複を避けるために省いた。



表-6 畑転換に伴う孔隙分布の推移 (1971~1973)

年次	項目 層位	孔 隙 量 (%)			表層30cmの pF1.5~2.7保水量 (mm)
		pF0~1.5	pF1.5~2.7	pF2.7~4.2	
転換前	1	0.2	3.5	16.0	11.5
	2	0.1	2.6	20.4	
転換初年目	1	28.9	3.2	6.7	11.3
	2	2.8	4.4	15.2	
転換2年目	1	25.8	6.9	8.9	15.6
	2	1.7	3.5	17.0	
転換3年目	1	21.7	9.3	10.6	20.5
	2	1.3	4.4	9.5	

表-7 畑転換に伴うトウモロコシの収量の推移  
(1971~1975 青田)<sup>8)</sup>

年次	項目	乾草収量 (kg/a)
転換初年目		99.1
〃 2年目		124.8
〃 3年目		133.6
〃 4年目		155.0
〃 5年目		184.3

### まとめ

塑性限界/pF 1.8-含水比は重粘土畑における易耕性や土壌構造の安定性を知る指標として、また、転換畑において畑地化の程度を知る指標として使用できる。さらに、重粘土水田において水分条件を消去した土壌の硬さの性質を数量化できるなど、適用範囲は広く、基盤整備や土壌管理にその活用が考えられる。

### 文 献

- 1) 野口彌吉, 福田仁志訳 (1955) : 土壌の物理的性質と耕耘, L. D. ペーパー, 土壌物理学 315-352
- 2) P. Boekel and P. K. Peerlkamp (1956) : Soil consistency as a factor determining the soil structure of clay soils. Neth. J. Agric. Sci. 4, 122-125.
- 3) P. Boekel (1963) : The effect of organic matter on the structure of clay soils. Neth. J. Agric. Sci. 11, 250-263.
- 4) 久保田徹 (1984) : 重粘土水田土壌の地耐力診断の

ための土壌構造指数, 日土肥誌, 55, 173-179.

- 5) 久保田徹 (1971) : 作土の構造維持に対する有機物施用の効果, 日土肥誌, 42, 7-11
- 6) 久津邦浩三, 宮崎直美 (1983) : 水田の畑転換による理化学性の変化, 北海道農試研報, 137, 107-125.
- 7) 山崎信蔵 (1978) : 低湿重粘土水田転換畑における耕耘方法, 農林水産技術会議事務局, 研究成果108, 稲作転換推進対策試験, 87-88.
- 8) 青田精一・星野正夫 (1978) : 低湿重粘土水田の転換畑におけるトウモロコシ収量の年次変化, 日草誌, 24, 118-122.
- 9) 中野啓三 (1983) : 重粘土転換畑における易耕性の評価—塑性限界と pF 1.8-含水比の関係—, 土壌の物理性, 48, 38-43.

### 質疑応答

座長 粘質土壌はコンシステンシーが劣っており、畑転換ではその改善をはかる必要がある。中野さんは、易耕性の指標として塑性限界/pF 1.8含水比の有効性と、それに基づいて畑転換整備のための改善法についてお話し下さいました。御質問をお願いします。

安富 (茨城大) 暗渠の排水効果と塑性指数変化との関係について教えてほしい。

中野 (四国農試) 亀裂が発生した所及び作土では塑性限界/pF 1.8含水比が大きくなります。いわゆる物理性が変化してくるのです。

# 力学性にもとづく土壌構造の評価法 ——団粒構造を中心として——

新 恒 雅 裕\*

Evaluation of Soil Structure Based on Soil Deformation Behavior (especially on Aggregated Soil)

Masahiro ARAGAKI

Faculty of Agriculture, Mie University

## I まえがき

土壌は力場において種々の力学的挙動を示す。その挙動は力と変形との関係によって特徴づけられる。物体の変形はたとえば弾性変形、塑性変形および流れのような狭義の変形に類別できるが、現実測定（観察）される物体の変形は、これらが総合されたものである。このような意味において土壌の力学的挙動は、力により生起する広義の変形にかかわるものである。降伏（類似語としての強度、破壊あるいは破断）の現象は、変形過程の特殊な段階であるといえる。

土壌に変形を生ぜしめる要因には外力と内力とがある。外力（重力を含む）による変形は最も一般的なもので、圧縮、締固め、せん断（ずり）、流動などの広範囲の現象に関係する。内力は土壌内部の固相、液相、気相の相互作用によって生ずる物理化学的力で、鉄酸化物、ケイ酸化合物のほか有機物による粒子接着作用もこれにあたる。温度差や湿度差の環境要素が誘因となって土壌内で生ずる力も含めれば、内力にもとづくマクロな変形現象として凝集、収縮、膨張、相変化を伴う凍上などがある。

現象論的にみた変形には体積変形と形状変形とがあり、変形テンソル  $T_{def}$  のうち等方成分  $T^0_{def}$  および偏差成分  $D_{def}$  がそれぞれ前者および後者の変形を特性づける。実際の土層レベルでの土工やその他の変形の諸問題では、体積と形状の基本的変形が複合した現象となって現われる。力学的現象としての変形挙動を土壌物理性と関連づけて評価する場合、力場における土壌構造の変化を把握することが必要である。

本報告は主として外力による圧縮変形と乾燥収縮による変形挙動を扱い、これらと緩和特性、土壌構造との関係を考察したものである。圧縮と収縮は外力と内力による体積変化を伴うという点で共通性がある。主に対象とする土壌は団粒系のものであり、必要に応じて砂質土系

（単粒構造系）、粘質土系（壁状構造系）のものを比較対象の土としてとりあげる。

## II 力場と土壌構造

### 1. 土壌の力学的構造モデル

土壌構造は概念的には各種の力に基づく固相、液相、気相の立体的組成として理解されている。骨格に基づく変形機能に視点を置いた場合の土壌構造は粒子の結合と配列による骨格形成の状態である。土壌の変形は必ず構造上の変化を伴うが、両者の関係の統一的整理はなされていない。考慮する現象によって構造モデルが異なる場合が多く、また応力、変形、時間などの関係を定める状態力学方程式<sup>1)</sup>（構成方程式、レオロジー方程式）も相異なる。力学性からみた構造モデルをいくつか挙げてみる。

#### (1) 幾何学的組成に関するもの

1) 粘質土系 ①板状粒子のカードハウス状の空間的組成 (1957, Tan<sup>2)</sup>), ②有機物や粘土粒子による結合作用を考慮したもの (1959, Emerson<sup>3)</sup>), ③表面活性に基づく粒子接触の様式 (1963, Van Olphen<sup>4)</sup>), ④単一粒子の配向の程度に基づく粒子配列 (1966, Yong and Warkentin<sup>5)</sup>), ⑤電子顕微鏡の観察による立体的モデル (1970, Pusch<sup>6)</sup>), ⑥構造単位（ベッド、クラスター、ドメイン）内の粒子配向性モデル (1975, Yong and Warkentin<sup>7)</sup>), ⑦大きさにより区分されたベッドとポア (Pore) の段階的モデル (1976, 松尾・嘉門<sup>8)</sup>)。

これらのうち①～⑤は主として粒子による骨格系のモデル化である。比較的新しい⑥、⑦は構造単位の間隙部分も考慮されていて、突固めや圧密などの変形過程と構造変化の説明に用いられている。

2) 砂質土系 いわゆる粒状体に関する構造モデルで、主として変形特性を説明するものである。⑧粒子接触面のせん断方向に対する傾きの不均一性を考慮した微視的

\*三重大学農学部

変形モデル (1957, Newland and Alleyly<sup>9)</sup>)。これはせん断時のダイレイタンスを説明し得るモデルである。

⑨剛体円形粒子間を力学的模型で連結し、変形面の法線方向、接線方向を区別して表わしたモデル (1979, Cundall<sup>10)</sup>)。粒状体モデルは他にも種々あるがこれらの2例を挙げるにとどめる。

3) 団粒系土壌 ⑩小団粒により大団粒が形成される団粒構造の模型 (1957, Michurin<sup>11)</sup>) がほとんど唯一のものである。農学分野ではこれが基本的モデルである。農地土壌は本来植物生育の培地として間隙部分における物質 (水, 空気など) およびエネルギー (熱) の収容, 移動が最重要視された。本モデルは植物生育上望ましい間隙特性を定性的に説明するものとして位置づけられて来た。このほか⑪団粒構造形成の要因である腐植の存在形態を仮定した粘土・腐植複合体モデル (1976, 前田・相馬・佐々木<sup>12)</sup>) がある。これらは力学性概念は与えられていない。

(2) 変形の現象論に関するもの

土壌を含めたいろいろの物体の応力あるいは変形の状態を現象論的に記述する場合, 応力・歪の関係のような物体特有の基本式が不可欠である。これは既述のような状態力学方程式あるいは構成方程式, レオロジー方程式と呼ばれ, 一般的には次式で表わされる。

$$f(\sigma, \theta, \epsilon, \dot{\epsilon}, T, \dots) = 0$$

ここに $\sigma$ : 応力,  $\theta$ : 降伏値,  $\epsilon$ : 歪,  $\dot{\epsilon}$ : 歪速度,  $T$ : 温度。対象物体が土壌の場合, その性状や扱う現象によって変数が選択され, 従って基本式が異なる場合が多い。即ち理想物体の力学性を表わす弾性, 塑性, 粘性のうち単一体か2つ以上の組合せによる複合体で土壌の挙動を近似する。たとえば粘弾性模型のバーガース (Burgers) 体は土の遅延弾性の現象<sup>13)</sup>や力学的転移点<sup>14)</sup>を説明し得ることが示されている。金属材料や土質材料を対象とする分野では弾塑性体としての扱いが多くなされている。

(3) 土・水系の力学的モデル

土粒子・水の相互作用を重視して土壌の工学的性と構造性を関連づけようとする考え方である。土壌水のエネルギーの取扱い<sup>15)</sup>に立脚して, 妹尾<sup>16)</sup>は熱力学的な相圧概念を加えて土粒子・水系の工学的性の理論的基礎を与えた。土壌の工学的性や保水性が土粒子・水系のエネルギー指数 (pF) によって表わされる。この場合力学的挙動はレオロジー的に説明される場合が多く, 力学性と構造, 水分保持特性の相互関連性についての成果が多く蓄積されている。たとえば須藤<sup>13)</sup>はエネルギー論的に力学的状態量を規定し, 種々の現象を統一的に整理する

試みを行った。この分野での状態モデルは $\Delta\mu = \Sigma Pi + Pe$  ( $\mu$ : 土壌水の化学ポテンシャル,  $Pi$ : 内部圧,  $Pe$ : 相圧) であって, 力学的挙動の現象論と土壌物性とを結びつける努力がなされている。

2. 土壌構造の要素と相互関係

土壌の力学的構造は力場における土壌構成物質の空間的配置関係である。従って巨視的な構造要素として, 力場, 物質, 空間配置の3つが考えられる。前節1.で概観した土壌構造の種々のモデルは, 各要素に対する重点のおき方の程度が異なるように思える。

構造要素間の相対関係を整理して図-1に示す。力場

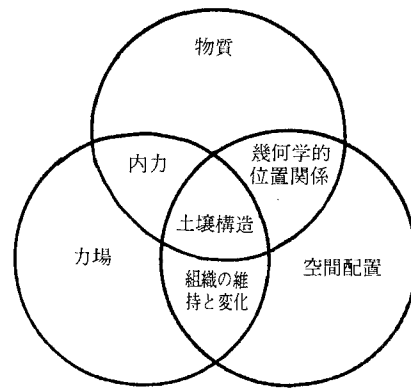


図-1 力場と土壌構造の概念

は外力 (いわゆる面力, 重力, 生物の作用等) と内力 (物理化学的作用に基づく種々の力で, 有機物質等による接着作用も含める) に分けている。構造形成は基本的に内力に基づくものとし, 外力は組織の空間的配置を変える外力要因として構造にかかわるとみなした。物質は固相, 液相, 気相がある。配置は物質の空間的位置関係を表わす。同図により土壌構造は外力・内力による土壌構成物質の可変的空間組成であることが示されている。

図-1に基づいて2, 3の検討を加える。砂質土の固相は表面活性のない鉱質粒子が大部分であって, 内力は毛管作用力が主である。従って土壌構造を本質的に粒子系のものとし, 構造単位の粒子の性質と結合性を用いて表現すれば, 砂質土は無孔性・硬質粒子の単独系とみなせる。粘土粒子は一般にファンデルワールス力や静電力的力などにより凝集しているのので, 粘質土は無孔性・硬質粒子の複合系とみなす。ここでの無孔性は粒子内部の孔隙を無視することを意味し, 硬質は粒子の硬さが集合体のそれより十分大きいことを示す。団粒系土壌は凝集した粘土粒子に有機物質等による接着作用が加わり, 非固相部分 (とくに気相) を多くもつ構造単位の粒子 (団粒) を形成する。従って団粒系土壌は多孔性・軟質粒子

の複合系である。土壤構造を土壤の機能の側面からみると、骨格を主とする変形機能とともに、既述のように間隙空間による物質、熱などの貯留・輸送機能も重要である。この意味で多孔性・軟質粒子の複合系である団粒構造の土壤は、他のものに比べて構造と力学性に関する普遍的問題を包含する対象であろう。

土壤構造は可変性であり、土壤構造の規準状態は定め難い。一般に実用的目的から初期状態が設定され、限られた変形過程あるいは状態変化の間における構造上の対応が調べられている。ここで扱う団粒構造の初期状態は、近似的に自然構造とみなされる状態のものである。また重力場の影響は無視し得るとし、土層中の土壤とその構造を乱さないで採土した後の土壤は同一の性質のものとして考える。

### III 階層性からみた土壤の団粒構造

#### 1. 団粒の土壤物理性と間隙特性

土層における土粒子は特殊な場合を除き程度の差はあるが団粒化していると考えられる。団粒系土壤である黒ボク土のような有機質土では、団粒がその基本的構造単位として位置づけられている。団粒自体が多孔性であるので黒ボク土では骨格部分と間隙部分が不可分である。従って団粒の物理性および力学性が土壤体のそれらを規定する要因となる。

特にことわらない限りここでの団粒は非アロフェン質の黒ボク土の生土から乾式篩別で分離したものとする。団粒の有機物含有量(Co)は、図-2のように団粒径(d)により異なる。Co~dは極小値を1つもつ下に凸の曲線(convex curve)で表わされる。アロフェン質の大山黒ボク土<sup>17)</sup>も同様である。このような関係は、自然構造をもつ試料のCoがおよそ10%以上のものについてみられる。Coが数%の試料や、団粒構造が種々の要因で変動している耕地土壤の場合は定かでない。Co~dの全体的形状は一般性をもつとみてよい。なおCoの極小値を与える粒径は、団粒分布の最大値を与える粒径に近似する<sup>17)18)</sup>。Coの極小値や最大値を示すdは試料のCoによってやや異なる。このほか含水量などの分離時の条件も変化の要因となろう。

土壤腐植は多孔質の海绵状態で保水性が高いことはよく知られている。pF・水分量やアッタベルグ限界値からみた団粒の保水性は、団粒の大きさとCoの関係に対応した変化を示す<sup>18)</sup>。

ここで土層を構成する団粒の集合状態を、団粒の特性を考慮した試算により検討してみる。団粒分布(後述)と間隙率(n)~dの関係<sup>19)</sup>から全団粒の間隙率(n<sub>t</sub>)が算出される。n<sub>t</sub>と現場土層のnとの差Δnが団粒間隙率

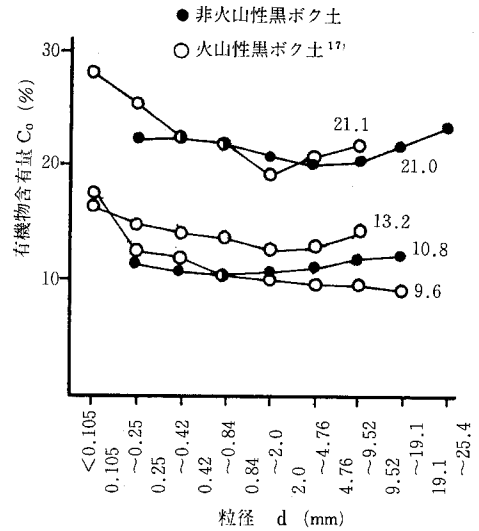


図-2 団粒の大きさ(d)と有機物含有量(Co)  
(図中の数値は試料のCoを示す)

となる。団粒間隙の測定法<sup>20)</sup>の相異にかかわらずΔn/n=0.07~0.09であり、団粒間隙の割合は約1割である。この値は試料が乾燥すると団粒が収縮するので幾分変化するであろう。

Michurinのモデル<sup>11)</sup>によれば団粒の集合によってより大きい団粒が構成される。この場合団粒の構成上の階層数(N)とnは $n = (1 - T^N) \times 100 (\%)$ で表わされる(図-3)。ここでTは単位容積中の粒子の容積で一定としている。T<1であるのでn~Nの漸近線はn=100である。即ちNの増加とともにnは高くなる。粒子系における最密、最粗の平均的充填による間隙率(n)を仮定して、団粒についての階層数と間隙特性はすでに検討されている<sup>21)</sup>。同様の考え方を土層レベルまで拡張してみる。図-4は土壤のnがCoの増加に伴い高くなる

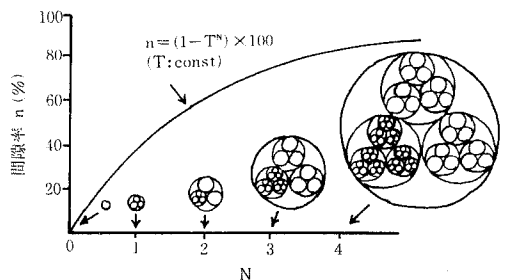


図-3 団粒の階層数(N)と間隙率(n)  
(T: 粒子の容積比率)

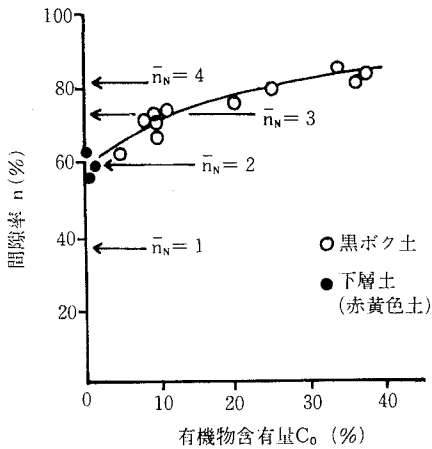


図-4 土壤の有機物含有量 $C_o$ と間隙率 $n$

ことを示す。 $n \sim C_o$ は団粒についての $n \sim d^{21}$ および $n \sim N$ (図-3)と同様の形状(上に凸の増加曲線)を示す。即ち団粒が大きくなると階層数が増え、この場合より多くの腐植量が必要であることになる。図-4より $C_o$ の段階的範囲で $N$ は次のように区分される。i.  $C_o < 5$ ,  $N = 2$ , ii.  $5 \leq C_o < 10$ ,  $2 < N \leq 3$ , iii.  $10 \leq C_o < 30$ ,  $3 < N \leq 4$ , iv.  $30 \leq C_o$ ,  $4 < N$ 。従来篩別された団粒の分類は、たとえば植物培地としての好適条件を考慮して微細団粒( $< 0.25\text{mm}$ )と粗団粒( $0.25 \sim 7(10)\text{mm}$ )に分け、これより大きいものを土塊( $> 7(10)\text{mm}$ )としている<sup>22)</sup>。前述のような $C_o$ による $N$ の区分を用い得るとすれば、以下のような団粒の集合状態が一応考えられる。

(1次粒子) → 微細団粒 → 粗団粒 → 団粒塊  
 primary particle. microaggr. macroaggr. super-N  
 $N = 0 \sim 1$      $N = 1 \sim 2$      $N = 2 \sim 3$     macroaggr.  
 → 土塊     $N = 3 \sim 4$   
 clod  
 $N = 4 \sim$

2. 団粒の分布特性

団粒分布は団粒による土壤の構成様式を表わす量的指標である。団粒分布はある粒径範囲( $d$ )の団粒の質量%(これを $W_d$ で表わす)で表示される。図-5に示すように $W_d \sim d$ は上に凸で極大値を一つもつ曲線(concave curve)であり、分析条件(乾式・湿式の相異, 水分量のちがい)によらない。このような $W_d \sim d$ の一般的形状は、火山性黒ボク土<sup>17)</sup>やそのほかの測定例<sup>23)</sup>と同様であるが、最大値を与える $d$ は分析条件によって異なる場合が多い。この点を物理的に力学的に明確にすることは、団粒の生成・崩壊の機構を解明することと本質的に同じことである。土壤を構成粒子に分離する場合、

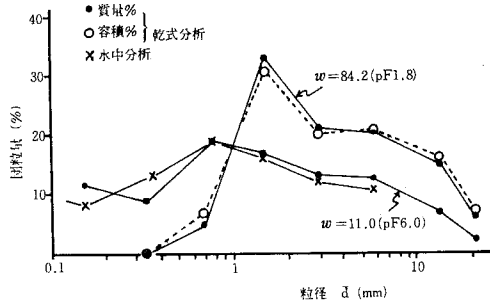


図-5 分析条件と団粒分布

分離の外力が重要である<sup>24)</sup>。団粒分析は外力が0の土層における状態から、外力が最大の粒度分析(完全分散)までの中間的位置にある(ただし外力による鉱質粒子の破碎は除く)。

団粒分布は質量表示がなされて来た。しかし団粒の大きさにより間隙率が異なる上に構成土の真比重も異なる<sup>21)</sup>。従って団粒による土壤構成を考える場合は容積表示の方が合理的で、粒子系による空間配置の検討や間隙量の把握等における実用的意義も大きい。団粒( $i$ )の質量%を $W_{d,i}$ とすれば、容積% $V_{d,i}$ は次式で表わされる。 $V_{d,i} = (\bar{\rho}_d / \rho_{d,i}) \cdot W_{d,i} = \{ \bar{G}_s (1 - \bar{n}) / G_{s,i} (1 - n_i) \} W_{d,i}$ 。ここで $\rho_{d,i}$ ,  $G_{s,i}$ ,  $n_i$ は団粒( $i$ )の乾燥密度, 真比重, 間隙率であって $\bar{\rho}_d$ ,  $\bar{G}_s$ ,  $\bar{n}$ はそれぞれの全体の平均値である。本式で算出された $V_d \sim \bar{d}$ (図-5における破線)は $W_d \sim \bar{d}$ よりやや扁平となるが形状特性は変わらない。 $\bar{d} = 1 \sim 5\text{mm}$ のものでは減少し、それ以外のものでは増加する。

土壤が外力によって圧縮変形を受けると団粒分布は変化する。図-6に圧縮前の団粒量( $W_d$ )に対する圧縮後

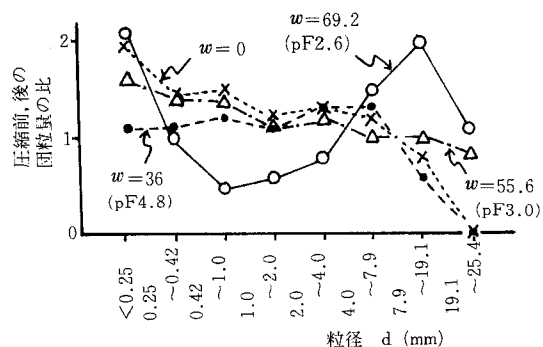


図-6 土壤の圧縮による団粒分布の変化(圧縮力は $1.5\text{kgf/cm}^2$ , y軸は圧縮前に対する圧縮後の団粒量の比)

のそれの比の値を示す。同図は標準サンプラー数個についての結果であり、圧縮力 $1.5\text{kgf/cm}^2$ は団粒塊の圧縮強度に対応する値を越えている(後述)。 $w > pL = 62.2$ の湿潤状態では $d > 4\text{mm}$ の団粒は圧縮によって増える。これは $d = 0.42 \sim 4\text{mm}$ のものが外力によって結合し結果的に大きな団粒となるからと思われる。この場合団粒の崩壊・形成が同時に生ずると考えられる。 $w = 55.6$ で比較的 $pL$ に近い状態では、圧縮前、後の団粒分布が最も近似する。 $w < pL$ では( $w = 36, 0$ の場合)大団粒は減少か消滅し $d < 7.9\text{mm}$ のものが増加し、全体的に団粒塊の細分化が支配的になる。団粒の力学的安定・不安定は外力との相対関係で決まるが、さらに含水量も団粒分布に影響を与える。

### 3. 立体的団粒構造の模式化の試み

前述のような団粒の土壌物理性と間隙特性、団粒の量的分布の特徴と外力による可変性さらに個々の団粒の力学性を考慮して、力場における空間的な団粒構造の設定に関する試みを行う。

いま図-2, 5の結果を図-7に示すような模式曲線 $C_0 \sim d$ ,  $V_d \sim d$ で近似する。 $C_0$ ,  $V_d$ の最小値, 最大値を与える $d$ を $d_3$ とし、図のように粒径の大きくなる順に $d_1 \sim d_5$ を設置する。 $C_0 \sim d$ 曲線において $C_0$ の同じ団粒

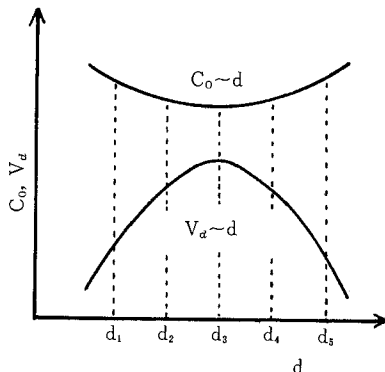


図-7  $C_0 \sim d$ ,  $V_a \sim d$ の模式図  
( $V_a$ : 容積表示の団粒量)

は互いに接触し(たとえば $d_1$ と $d_5$ ,  $d_2$ と $d_4$ ),  $C_0$ の差が1段階のものは近隣にあり(たとえば $d_1$ と $d_2$ ,  $d_2$ と $d_5$ など), 差が2段階のものは離れている( $d_3$ と $d_1$ ,  $d_5$ )場合が多いと仮定する。また量的には $V_d \sim d$ 曲線から $d_3$ のものが最も多く $d_1$ ,  $d_5$ のものが少ないものとする。ここでは $d_3$ 以上の大きさを大団粒とし、それ以下のものを小団粒として区別する。従って空間組成では $d_3$ の団粒が主要部分を占め、 $d_5$ の大団粒は点在し、 $d_1$ の小団粒は数多く散在するであろう。さらに $d_3$ 以上の団粒については $d_5$ ,  $d_4$ ,  $d_3$ の順に硬さが増す傾向があ

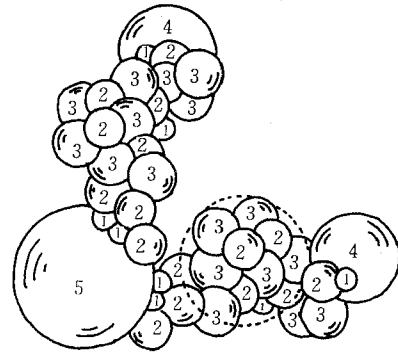


図-8 団粒の空間配置の提案

り<sup>19)</sup>,  $d_3$ は力学的にも安定しているとみなす。土壌体が圧縮変形を受けると大団粒( $d_4$ ,  $d_5$ )が崩壊して小団粒に分離し易いと同時に、小団粒群が結合して大団粒を形成する2つの方向があることは既に述べた。

以上のことから図-8のような団粒構造の空間的模式図を考えることができる。図中の破線部分は外力による可変性を示す。たとえば図-6に関して既述のように、外力により小団粒群の大団粒化あるいは大団粒の小団粒群への分離がおり得ることを示している。模式図と常識的な団粒構造の平面的概念図<sup>24)</sup>を比較した場合、後者では大団粒が最も多い。破線部分を、団粒分析の外力より弱い結合力で団粒化しているとみれば模式図と概念図は類似する。図-8は団粒の物理性に基づく配列、大団粒の硬さおよび団粒分布の特性と外力による変化が考慮されている。従って団粒を力場における行動単位として位置づけた場合模式図の方が妥当であろう。

## IV 外力による変形挙動と構造変化

### 1. 団粒構造における変形過程

団粒を平行2平板間で圧縮したときの測定結果をまとめると図-9のようになる。崩壊前後とも複雑な変形過程をとり、力 $\sim$ 変位は多様な経路を辿る。団粒を粘土・腐植複合体に基づく、軟質の多孔性粒子から成る段階的構造物体とすれば、団粒の変形は粘土・腐植複合体としての粒子の結合状態と配列関係が変化する過程である。この場合図-10に示すように団粒間および団粒内部の変形機構として次のようなものが考えられる。i. 圧縮, ii. 滑動, iii. 転動, iv. 崩壊, v. 形状変化。i. は接触面の法線方向における接触変形である。ii. は接線方向のもので、iii. はいわゆる回転であるが、粒子が腐植物等を介在して接触しているため回転に伴う抵抗がある。iv. は部分的におこると考えられるが、団粒系土壌の変形ではこのような内部崩壊は比較的初期段階で生ず

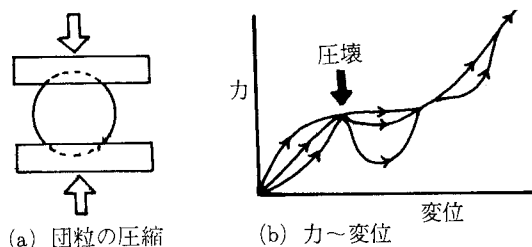


図-9 団粒の圧縮における変形様式

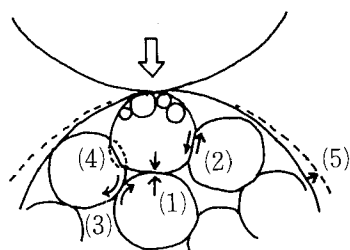


図-10 団粒間および団粒内部の変形機構の模式図(1)圧縮, (2)滑動, (3)転動(回転), (4)崩壊, (5)皮殻の曲率変化)

るであろう。v. は皮殻の曲率変化に関するもので、含水比が高く腐植・水が一体となって機能するときおこり得る。i. ~ v. は独立に生ずるのではなく相互に依存し、種々の組合せが考えられる。内部変形のおこり方が一様でないため図-9のように結果として複雑な変形経路をとるとみられる。内部変形と全体的変形との関係については確率論的アプローチが必要であろう。

次に土壌体の圧縮変形の過程における団粒の挙動を実測結果に基づいて検討する。現場土層の構造を乱さない試料について、側方拘束の圧縮過程で得られる応力・歪曲線において特異部分の現われる場合が多い(図-11)。これらの部分的特異性は2度目以降の圧縮では全く現われないことから、各土壌の初期構造の圧縮による不可逆な変化に起因すると考えられる。砂質土の場合は $\sigma = 2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ にみられ、これは硬質粒子のかみ合いにおける不連続な変形過程である。軟質粒子系である黒ボク土では $\sigma = 1 \text{ kgf/cm}^2$ 前後でゆるやかな凹凸部分が現われる。これは構成団粒の崩壊によると考えることができる。土壌体中の個々の団粒に生ずる応力を $\sigma_i$ とすれば、実験上の可測量である $\sigma$ および $\epsilon$ を用いて次式で表わされる<sup>26)</sup>。  $\sigma_i = a'(\sigma/\epsilon)$ 。ここで $a'$ は団粒の変形と配列状態の仮定で決まる定数である。団粒を球体とし等径のものが密にかつ変形が外力の作用方向にのみ生ずるように配列していると仮定すれば $a' = \pi/\sqrt{3}$ とな

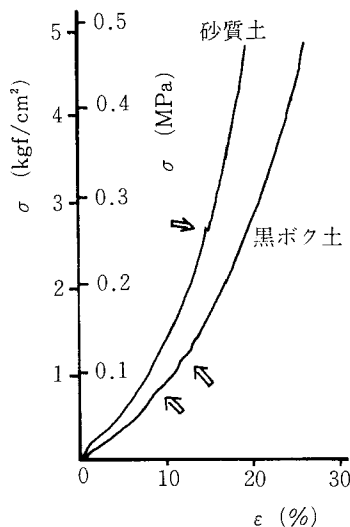


図-11 側方拘束の圧縮における応力( $\sigma$ )と歪( $\epsilon$ )の関係

る。特異部分における $\epsilon$ 、 $\sigma$ の値を前式に代入すれば、このときの $\sigma_i$ は個々の団粒の圧壊強度<sup>19)</sup>と近似する。土壌体の変形に関する一つの曲線を評価することによって、内部構造の変化を推定し得る好例であると思われる。

土壌中での粒子系の配列と変形はきわめて複雑であり、ここでの試算は力学性と構造性との関係を決定できるものではない。これを可能にするにはたとえば団粒構造の空間的模式図(図-8)に、各粒子部分(i)に生ずる実応力( $\sigma_{r,i}$ )の考え方を導入し、図-10に示したような内部変形のおこり方と変形抵抗を量的に表現し得る知見の集積が必要であると思われる。

## 2. 応力の緩和特性からみた土壌の挙動

### (1) 応力緩和時間

土壌の応力緩和にかかわる圃場レベルでの現象は少なくない<sup>27)</sup>にもかかわらず、この分野での研究成果の蓄積が遅れている。ここでは一定変形下における応力の緩和過程を規定し土層の変形に直接関係する緩和時間( $\tau$ )について考察する。

図-12は $C_0 = 21.0$ の黒ボク土を自然含水比で突き固めた土柱および団粒を整形した自然構造をもつ土柱について、含水比と $\tau$ の関係を示している。両試料ともに収縮限界付近で最小値をもつ下に凸の曲線(convex curve)である。突固め土柱の $\tau \sim w$ と内部構造との関係については既報<sup>28)</sup>のとおりである。図-12より $w < w_L$ では自然構造を有する方が突き固めたものより $\tau$ はやや小さい(後者も団粒は存在する)。

Maxwellのモデルによれば $\tau = \lambda/E$  ( $\lambda$ : 伸び粘性

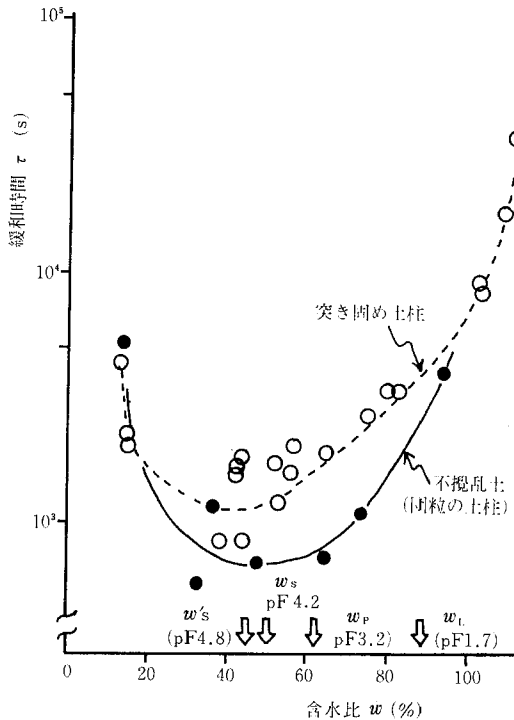


図-12 土壌構造と応力緩和時間 ( $w_l$ : 液性限界,  $w_p$ : 塑性限界,  $w_s$ : 収縮限界,  $w'_s$ : 団粒構造のある場合の収縮限界)

係数,  $E$ : 弾性係数) である。即ち  $\tau$  の増減は  $\lambda$  と  $E$  の相対関係で決まり,  $\tau$  の増加は相対的な  $E$  の減少と対応関係にある。安富<sup>29)</sup> は外力 (練り返えし) による軟化現象の機構を Burgers モデル (Voigt モデルと Maxwell モデルの直列模型) を用いて説明している。これによれば親水状態の不攪乱土を乱すと骨格構造が壊れて構造拘束水が自由化し, 無構造の親水状態になる。この場合 Burgers モデルのパネ部分 ( $E$ ) が劣化する。さらに十分に練り返すと粒子表面の拘束水が自由化し, ダッシュポット部分 ( $\lambda$ ) も劣化する。Voigt モデルは緩和機能をもたないので安富の結果から緩和時間の検討が可能である。第1段階の骨格構造の攪乱では  $E$  が減少するので  $\tau$  は増加することになる。十分に練り返すと  $\lambda$  も減少するので  $\tau$  の増減は直接判定できない。モデルの物理定数の変化を量的に把握する必要がある。

以上のような力学モデルによる定性的な検討によって, 緩和時間は自然構造を乱すと増加し, 応力消散が時間的に遅れることが想定できる。これは図-12の測定結果と対応する。

実際の土層において緩和時間と関係する力学的現象の

一例として, 弾丸暗渠の施工と土壌の変形を考える。一般論としては実用上から設定される目的によって応力緩和時間を制御する方向が定まる。弾丸暗渠については施工後の削孔断面をできるだけ維持するという前提がある。 $\tau$  が小さければ削孔体通過中の一定変形下において応力消散が大きく, 断面の縮少・閉塞化の力を減ずることになる。即ちここでの土層改良の目的から設定される  $\tau$  の変化は減少方向である。従って図-12に関する議論の結果から弾丸暗渠の施工に際しては, 土層の水分量を減少させ, 降雨直後の削孔をさけるのが良い。また施工速度を遅くするが削孔体を長くする (応力の消散時間を長くする) のが有利である。さらに土層を乱さない方がよいことを加えることができる。これらのことは土壌構造の改良目標を土壌の力学性から検討したものであって, 施工時間や工費, ケンリ抵抗の増加等の施工能率に関しては別の問題である。

階段工によって造成した排水不良畑において弾丸暗渠の施工を実施し, 施工速度と耕起が削孔断面の変化に与える影響を調査した。その結果は概して図-12についての内容と同様の傾向が得られた。

## (2) 力学性に与える応力緩和の影響

図-13に自然含水比で突き固めて乾燥させた黒ボク土の一軸圧縮強度  $\sigma_{max}$  ( $=qu$ ) および破壊時の歪  $\epsilon_{max}$  ( $=\epsilon_{qu}$ ) を示す。 $\sigma_{max} \sim w$  および  $\epsilon_{max} \sim w$  を直線近似でき,  $w$  に対して  $\sigma_{max}$  は負の関係にあり,  $\epsilon_{max}$  は正の関係にある<sup>28)</sup>。

一軸圧縮試験で得られる破壊点 ( $\epsilon_{max}$ ,  $\sigma_{max}$ ) の応力緩和後の変化の方向を矢印で示している (図-13)。 $\sigma_{max} \sim \epsilon_{max}$  は負の関係にあり, 変形上の脆性・延性の程度と強度上の硬・軟の程度は対応する。破壊点は緩和によって  $\Delta \epsilon_{max} < 0$ ,  $\Delta \sigma_{max} > 0$  となるように移動する。この場合  $\epsilon_{max}$  が減少するほど ( $w$  の減少方向),  $|\Delta \sigma_{max} / \Delta \epsilon_{max}|$  は増加する。破壊点の軌跡を模式的に示せば図-14のようになる。

## V 収縮挙動と土壌構造

### 1. 収縮による体積変化

土壌はいわゆる外力による体積変化とは別に, 脱水乾燥によって一般に体積を減じ間隙率が低下して密度が増加する。これらの変化の過程は内部構造により異なる。

比較的大きい団粒については, 粒径が大きくなると間隙率 ( $n$ ) も高くなることはすでに述べた。しかし乾燥収縮に伴う  $n$  の減少率  $|\Delta n / \Delta w|$  は逆に低下する。また団粒の自然構造をねり返しによって十分壊したねり土球<sup>18)</sup> は, 団粒に比べて  $n$  が小さいにもかかわらず特に



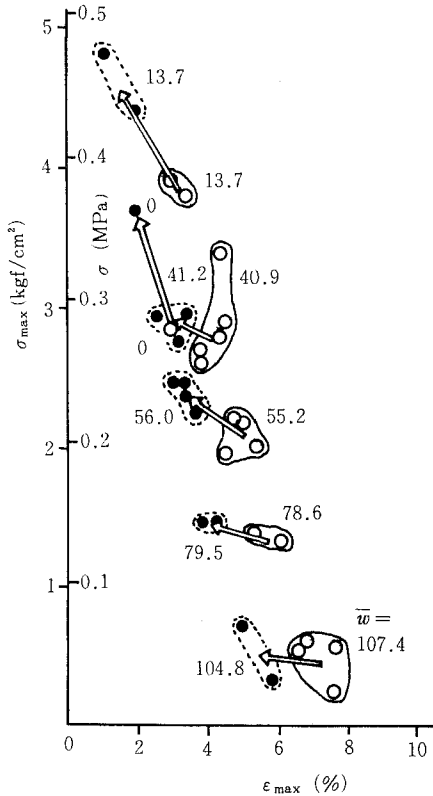


図-13 一軸圧縮の最大歪(ε<sub>max</sub>.)と最大応力(σ<sub>max</sub>.)  
におよぼす応力緩和の影響(O:緩和なし, ●:緩和  
後。図中の数値は平均含水比 $\bar{w}$ を表す)

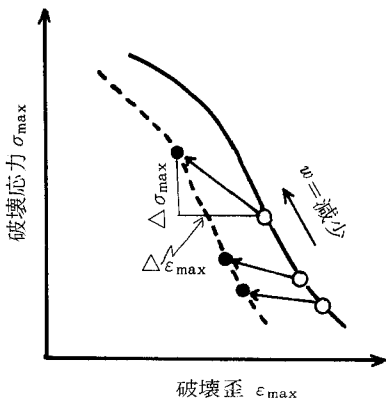


図-14 応力緩和後の破壊点(Δε<sub>max</sub>, Δσ<sub>max</sub>)  
の軌跡(実線は緩和前, 破線は緩和後、  
Δσ<sub>max</sub> > 0, Δε<sub>max</sub> < 0)

低水分領域を除き |Δn/Δw| が大きい。自然団粒では組織化の指標である階層数が増えて n が高くなると同時に、内部粒子の接触数も増え乾燥によって発生する等方的な力に対して、粒子の相対移動が起り難くなるからであると考えられる。団粒構造を壊すと内部粒子の相対

移動が容易になるので、n の変化速度も大きい事実が理解できる。これらは圧縮力による団粒の変形量との対応がある。団粒が外力下で圧壊するときの最大歪<sup>19)</sup>は  $w > pL$  では粒径の大きいものが小さく、また前述のねり土球では大きくなる。団粒構造の有無による収縮挙動の相異について竹中<sup>30)</sup>は、構造の発達した火山灰土をねり返すと線収縮率が増大し、粘質土の場合はその増加の程度は少ないとしている。これは前述の傾向とよく対応する。

図-15は不攪乱土(大団粒を整形した団粒土柱)と突固め土柱の収縮による体積変化率を比較している。突固

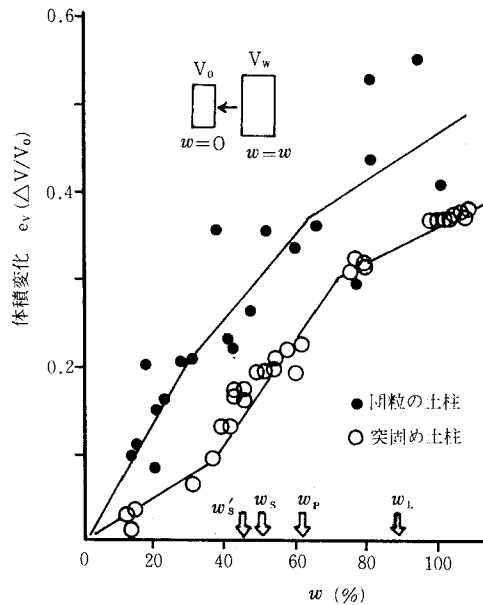


図-15 土壌構造と体積収縮

め土柱は収縮限界あたりで変曲部分のある比較的明確な S 字状の関係となる。一方自然構造のある土柱ではパラッキを伴うが、収縮限界以下の低水分側では突固め土柱よりも明らかに体積減少が急である。即ち団粒の骨格構造が収縮によって最も変化するのは、乾燥によって生ずる等方的内力が大きい水分領域であるといえる。また団粒構造がある場合はそうでない状態のものに比べて、体積減少率が低水分側に位置する。同様な傾向は佐藤<sup>31)</sup>がすでに指摘している。

## 2. 外力と収縮による体積変化について

一般に変形テンソル Tdef は  $Tdef = T^0def + Ddef$  で表わされる。T<sup>0</sup>def は等方成分で Ddef は偏差成分であり、応力テンソル Ts の等方成分 T<sup>0</sup>s と偏差成分 Ds がそれぞれ対応する。前者は体積変形に関係し、後者は形状変形に関係する。乾燥脱水による収縮はいわゆる内部

応力に基づく変形である。試料のあらゆる表面からの脱水(蒸発)を保障すれば、この場合の  $D_{def}$  は 0 で  $T_{def} = T^0_{def}$  となり、収縮変形は等方的となる(ただし試料は均質で密度流の影響を無視する)。乾燥による団粒の間隙率の測定、図-12、図-13、図-15および図-16の測定はいずれも等方的体積変形になるように実験条件を考慮した。円柱形試料の乾燥による半径方向および高さ方向の変形歪はほぼ同じ値が得られている<sup>28)</sup>。

試料の全表面から水分蒸発させないで乾燥脱水する場合は、体積変形のほかに、せん断(ずり)に類似する形状変形を伴う。収縮による変形を力学的に扱う際変形の成分を考慮する必要がある。

既述のように団粒の水分量低下による間隙率の減少勾配が小さい場合は圧縮歪も小さい。即ち収縮による変形量と外力による変形量は定性的に対応する。

図-16は外力(突固め)と収縮による黒ボク土の密度変化の相異を示している。およそ収縮限界以上の水分領

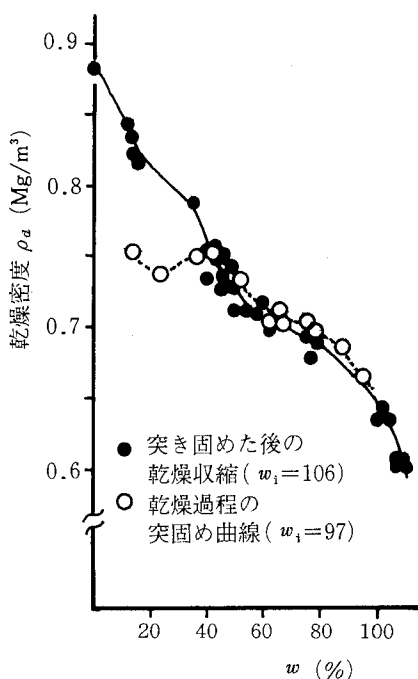


図-16 外力(突固め)と収縮による密度変化の相異

域では両者は大差はないが、それ以下の領域では収縮は進んで密度増加をもたらす、突固めの効果は低下する。このことから自然(現場)含水比で施工した後任意の含水比(収縮限界以上)まで乾燥した状態と、その含水量まで乾燥させてから施工した状態とを比較した場合、施工機械の転圧による密度増加には大差のないことが推察できる。

## VI ま と め

土壌の力学的構造は、力場における土壌物質の可変的空間配置であるとみなされる。多くの研究者によって提出された幾何学的な土壌構造のモデルは、現象論的解析に用いられる構成方程式と密接に関連づけられるべきである。本報告は団粒土壌の構造と変形挙動との関係を扱っている。

団粒の物理的・力学的性質の特徴および容積表示の団粒分布に基づき、団粒構造の三次元的モデルが提案された。

団粒間および団粒内の微視的変形が示された。そして土壌体の圧縮下における巨視的な変形過程から、団粒の挙動が調べられた。

応力の緩和時間が示され、圃場の土工における適用が安定的に試みられた。応力緩和後の、歪-応力平面における破壊点の軌跡が与えられた。

外力と収縮による変形挙動が土壌構造と関連して議論された。

団粒構造の土壌を中心に土壌構造と力学性、主として変形挙動との関係を検討した。本稿で扱った対象と方法はほとんど筆者が研究中の分野の範囲内に限られている。

土層の理工学における基本的認識の指摘および問題提起はなされたと思われる。

## 引 用 文 献

- 1) 横掘武夫 (1969) : 材料強度学, 技報堂
- 2) Tan, T. K. (1957) : Proc. 4th Int. conf. SM & FE, 3, 87~89
- 3) Emerson, W. W. (1959) : Jour. Soil Science, 235~244
- 4) Van Olphen, H. (1963) : An Introduction to clay Colloid Chemistry, J. Wiley & Sons
- 5) Yong, R. N. and Warkentin B. P. (1966) : Introduction to soil behavior, Macmillan.
- 6) Pusch, R. (1970) : Canadian Geotechnical Jour., 7, 1
- 7) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. (1975) : Soil properties and behavior, Elsevier Scientific Pub. Comp.
- 8) 松尾新一郎・嘉門雅史 (1976) : 土と基礎, 24, 1, 54~64
- 9) Newland, P. L. and Alley, B. H. (1957) : Geotechnique, 7, 1, 17~34
- 10) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L (1979) : Geotechnique, 29, 1, 47~65
- 11) S. V. Nerpín and A. F. Chudnovskii (1970) : Phy-

- sics of the soil, Israel Program for Scientific Translations
- 12) 前田隆・相馬尅之・佐々木清一 (1976) : 農土論集, 61, 9~17
- 13) 須藤清次・安富六郎・山崎不二夫 (1968) : 材料, 17, 175, 3~6
- 14) 東山勇・須藤清次 (1965) : 農土論集, 14, 27~31
- 15) 岩田進午 (1961) : 土肥誌, 32, 572~580
- 16) 妹尾学 (1965) : 農土論集, 14, 11~15
- 17) 河野洋・吉田勲・辻本学 (1983) : 農土誌, 51, 10, 45~53
- 18) 新恒雅裕・長田昇 (1977) : 農土論集, 71, 16~20
- 19) 新恒雅裕・長田昇 (1977) : 農土論集, 71, 21~26
- 20) 新恒雅裕 (1983) : 土の理工学実験ガイド, 41~44, 農業土木学会
- 21) 長田昇・新恒雅裕 (1980) : 三重大学農学部学術報告, 60, 43~51
- 22) レポート (1964) : 土壌物理 (農業水産技術会議事務局訳), 畑地農業振興会
- 23) 横瀬広司・山田宣良 (1977) : 農土論集, 70, 1~6
- 24) 八幡敏雄 (1975) : 土壌物理, 東大出版会
- 25) 前田隆・竹中肇 (1983) : 土の理工学性実験ガイド, 5~12, 農業土木学会
- 26) 新恒雅裕・長田昇 (1983) : 農土論集, 103, 74~80
- 27) 寺沢四郎 (1982) : 農技研報, B, 33, 55~94
- 28) 新恒雅裕 (1984) : 農土論集, 113, 41~49

- 29) 安富六郎 (1969) : 土壌物理, 176~177, 養賢堂
- 30) 竹中肇 (1965) : 農土論集, 14, 32~35
- 31) 佐藤晃一 (1979) : 土の物理学, 98~120, 森北出版

### 質疑応答

宮内 (愛媛大) 緩和時間と含水比の関係を自然土と突固め土で求められているが、緩和試験の初期応力 ( $\sigma_{t=0}$ ) はどのように求められたのですか。また、突固め土の構造破壊の程度はどのくらいでしたか。

新垣 (三重大) 初期応力 ( $\sigma_{t=0}$ ) は一応いろんな含水比で一軸圧縮強度を求めておきまして、その $\frac{1}{2}$ のところに設定しました。構造破壊の程度は自然含水比で湿潤密度が生土で $0.7 \text{ gf/cm}^3$ であったものが、突固め土では $1.3 \text{ gf/cm}^3$ となります。実際の程度団粒が破壊されているかにつきましては、光学的手法による観察が必要だと思います。

須藤 (茨城大) 干拓地の弾丸暗渠は一般に縦に長い卵型になるが、これを新垣モデルではどのように説明しますか。

新垣 縦に長い型ですか。縦に長い型になるか、横に長い型になるかについては、土圧や外力の作用、土層の収縮も影響すると思います。施工直後に実は、この前観察しましたほとんどが横に長くて、さてどちらが本物かなと思いましたが、自然構造を壊した後は縦にも長かったと思います。測定結果がまとまりましたら発表させていただきます。

# 基盤整備水田と土壌構造

上 田 弘 美\*

Changes in soil structure of paddy fields due to land consolidation

Hiromi UETA

Tottori Agricultural Experiment Station

## 1. はじめに

日本における水田の基盤整備は、1963年以来農業近代化のために全国的に実施されて来た。これは、大区画整理を中心として水田耕地の基盤を根本的に改革し、大型機械化営農を推進し生産性の向上をはかるためである。

鳥取県でもすでに水田の½が大区画のは場整備を完了している。この間、筆者らは基盤整備に伴う土壌の変化について土壌調査を実施して来た<sup>1)</sup>。

そこで本報では巨視的な見地から土壌構造に関連のある事項について述べることにする。また基盤整備後の水田の土壌構造を進展させるために、鳥取県内の現地水田等において各種の土壌改良試験を実施して来たので、その若干の事例についても紹介する。

## 2. 土壌断面形態の変化

### (1) 土壌断面形態の変化

鳥取市千代地区や邑美地区のは場整備の例をみると、施工前に灰褐色土壌であったものが、施工後には作土、次層ともグライ化し、灰色土壌やグライ土壌のような形

態になった。また糸根状、膜状及び管状斑鉄やマンガン結核等が消失し、活性二価鉄が増加し、ディピリジル反応が強まった。

もともと水田土壌の層序は、永年にわたる水稲栽培により、作土、鋤床及び心土に分化し、また亀裂や植物根による孔隙が多い。しかしながら、施工時の重作業機により土壌が圧縮され、施工前に発達していた各種の土壌構造が変化したことが土壌断面調査によって観察された。その結果、土壌硬度の増加や水の垂直浸透の減少により、作物の生育に悪影響があるものと考えられる。

### (2) 土壌三相と水分特性及び透水係数

倉吉市蔵内地区の土壌は礫質灰色低地土、灰褐色（松本統）で、土性は殆んどSLである。この地区は1963年基盤整備後に透水性が著しく低下したため土壌調査を実施した。調査地点は施工田10箇所、隣接の未施工田の土壌と比較した。その結果を平均値で示したものが表-1である。

これによると、施工に伴い固相率の変化が著しく、施工前から施工後の固相率の変化は33.5%から48%へと増加した。また現地における空気率は15%から5.8%へと減少し、透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-4}$  (平均値 $5.2 \times 10^{-4}$ )

表-1 土壌三相と水分特性及び透水係数

地区	区分	全重 g	固相率 %	水分率 %	空気率 %	孔隙率 %	pF水分分布 (%)				透水係数 cm/sec
							0~1.5	1.5~2	2~2.7	2.7~3.8	
蔵内	未施工	155.1	33.5	51.5	15.0	66.5	10.2	4.4	—	—	$5.2 \times 10^{-4}$
	施工後	177.2	48.0	46.1	5.8	52.0	3.2	3.1	—	—	$2.4 \times 10^{-5}$
千代	施工前	163.7	42.5	50.5	7.0	57.5	5.4	1.6	6.6	15.8	$5.0 \times 10^{-3}$
	施工後	174.5	47.1	49.0	3.9	52.9	2.2	1.8	3.9	15.7	$6.4 \times 10^{-4}$
	一作後	172.8	48.3	48.7	3.0	51.7	1.2	1.8	3.8	16.7	$4.7 \times 10^{-4}$
安田	施工前	146.6	37.9	53.5	8.6	62.1	8.6	—	—	—	$3.3 \times 10^{-3}$
	施工後	161.9	40.0	50.7	9.3	60.0	9.3	—	—	—	$1.8 \times 10^{-3}$

\*鳥取県農業試験所

cm/sec から $10^{-5} \sim 10^{-6}$  (平均値 $2.4 \times 10^{-5}$ ) cm/sec へと低下した。

また1966年に鳥取市千代地区において、施工前、施工後及び水稲1作後の土壤の変化を調査した。なお土壤は細粒灰色低地土、灰褐色系(多多良統)である。調査地点は10箇所であり、調査結果の平均値は表-1のとおりである。

施工前後の変化をみると、孔隙率は平均値で4.6%減少し、この地区もまた土壤の圧縮の影響をうけている。とくに減少の著しいのはpF 0~1.5の粗孔隙であり、施工前5.4%から施工後2.2%となった。またpF 2~2.7の毛管孔隙の部分においてもかなり減少がみられ、逆にpF 3.8以上の無効水分が増加した。また透水係数は平均で $10^{-3}$ のオーダーのものが $10^{-4}$ のオーダーへと低下したが、なかには $10^{-7}$  cm/secのオーダーのものも認められた。

施工後から水稲1作後の変化をみると、pF 0~1.5の孔隙がさらに減少し、pF 2.7~3.8の高pFの水分領域が増加することにより、水稲1作後でも構造変化が認められた。

一方、大山火山灰の影響を受けている安田地区は、表層腐植質多湿黒ボク土(三輪統)の土壤であるが、調査地点4箇所の施工前後の土壤の変化についてみると、表-1のとおりで他地区ほど変化は少なく、透水係数も $\frac{1}{2}$ に低下したにとどまった。

このように、土壤の圧縮やねり返しによって土壤構造の変化が認められ、土壤の透水性は低下する傾向にある<sup>2)3)</sup>。しかしながらその変化の程度は、土壤の種類や施工条件によってかなり相違するものと考えられる。そこで1963~1964年に施工された代表的な4地区において、施工後3~4年の水田土壤の粗孔隙と透水係数の変化について検討した<sup>4)</sup>(図-1)。調査地区の土壤は、玉鉾地区が第三紀系の粘土質(多多良統)、蔵内地区は礫質土壤(松本統)、安田及び中田地区は黒色火山灰土(三輪統)である。

粗孔隙の変化は蔵内地区がもっとも著しく、施工前15%のものが1作後5.6%へと低下したが、4作後には8.8%と3.2%増加し、透水係数は土性SLにしては低い $10^{-5}$  cm/secのオーダーから、ほぼ施工前の $10^{-4}$  cm/secのオーダーに回復した。玉鉾地区では、3作後では1作後より粗孔隙が1.4%増加し、透水係数も1作後 $10^{-6}$  cm/secのオーダーから $10^{-4}$  cm/secのオーダーへと回復した。黒色火山灰土である安田及び中田地区では、他地区よりも粗孔隙及び透水係数の変化は著しくなかった。

土壤が圧縮され、著しく構造変化をうけるのは、むしろ蔵内地区のような砂壤土であり、粘質土では粗孔隙及び毛管孔隙の質的变化をうけ構造が変化するが、黒色火

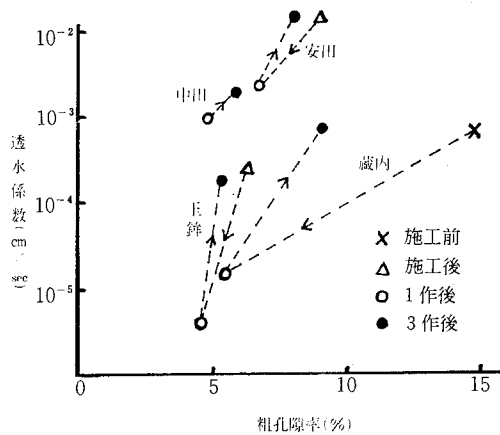


図-1 粗孔隙率と透水係数の変化

山灰土ではそれらの変化は少ない。黒色土壤では透水性が著しく低下せず、回復が早いことについては多くの報告がある<sup>6)7)</sup>。

何れにしても、施工後3~4年を経過すれば、土壤の乾燥に伴う亀裂の発生等により、土壤構造も変化して行くものと考えられる。

(3) 土壤の圧縮と水稲の生育

施工における重作業機の走行により、土壤が圧縮をうけて透水性が低下するばかりでなく、硬度が増加して、水稲の生育や養分吸収に影響があると考えられるので、1/2000aのポット試験により、1964~1965年に土壤の種類及び固相率の相違が水稲の生育に及ぼす影響について検討した。

供試土壤は玉鉾土壤(CL)、蔵内土壤(SL)、中田土壤(L)で、固相率は40%と50%になるように人工的に突き固めた。なお1964年は無肥料で、1965年は施肥条件下で実施した。図-2に固相率の相違による収量(もみ重)の変化を示した。

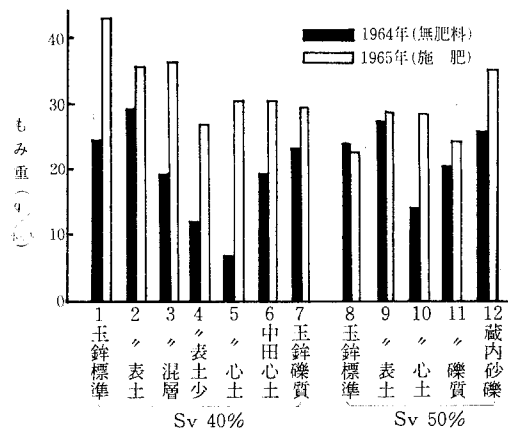


図-2 固相率の相違による収量の変化

1964年は無肥料栽培であったため、生育及び収量は肥沃な土壌の厚さに支配され、養分の少ない土壌では固相率の大きい方がもみ重も多かった。しかし1965年に施肥した結果では、固相率が50%へと増加すると、収量は固相率が40%のものより低下し、施肥増しても物理的悪条件が制限因子となった。

固相率が40%のとき及び50%のときの硬度分布について、SR-II型硬度計（コーン30°、6 cmf）で測定した結果は図-3のとおりである。

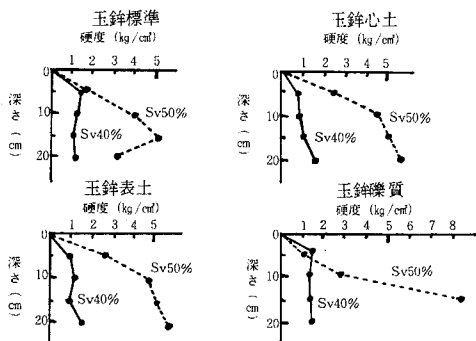


図-3 土壌の層別別硬度

これによると、固相率が40%のときには硬度は1.5 kg/cm<sup>2</sup>（山中式に換算して11mm）前後であるが、固相が50%になると硬度が著しく増加し、とくに礫質土では8.3kg/cm<sup>2</sup>（22mm）と著しく増加して、物理的条件が不良となった。

このように、土壌を圧縮すると、施肥して養分量が多いにもかかわらず、水稻は生育不良で収量は低下し、養分吸収量も減少の傾向があり、土壌硬度の増加により根の伸長が阻害されたものと考えられる。

### 3. 基盤整備田の土壌物理性の改良

#### (1) サブソイラによる心土破碎

鳥取市千代地区において、は場整備後の土壌物理性改良のために、1967年5月に犁型サブソイラにより、深さ30~40cm、間隔70cmで心土破碎を実施した。土壌は細粒灰色低地土、灰褐系（多多良統）で土性はCLである。

心土破碎を実施して水稻1作後の断面調査結果では、盛土部では亀裂の発生は少ないが、切土部では多く、第2層で膜状斑鉄の形成がみられ、水みちが観察された。

1作後の孔隙の状況を見るために、pF-水分分布曲線を図-4に示した。なお $\Delta pF=0.1$ として作図した。

この結果によれば、作土においてはサブソイラ処理により盛土部、切土部ともに変化はみられなかったが、チゼルの通過した第2層（17~23cm）においては粗孔隙の

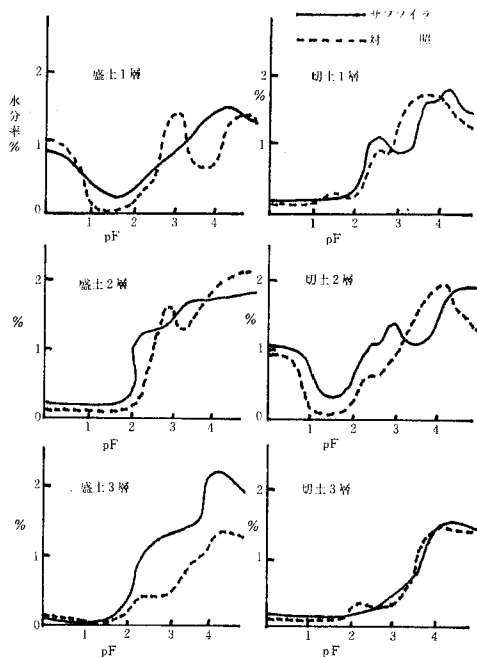


図-4 pF-水分分布曲線 ( $\Delta pF=0.1$ )

部分が増加し、その程度は盛土部ではわずかであるが、切土部では著しかった。第3層（50cm）では粗孔隙の増加は認められなかった。サブソイラ処理効果は、土壌がちな切土部の方がむしろ有効であった。

1967年から3箇年の水稻の収量の変化は表-2のとおりである。なお養分改善とは、施肥のほか土壌改良資材として10a当たり珪カル300kg+熔燐100kgを施用したものである。

盛土部ではサブソイラ処理のみでは増収効果はわずかしか認められないが、切土部ではサブソイラ処理のみでも1~2年間はかなり増収効果が認められた。また土壌の養分改善と心土破碎とを組合せることにより、3年後には盛土部よりも収量が増加し、670kg/10aでもっとも収量が高かった。

以上のとおり、心土破碎の効果は盛土部よりも、硬度が山中式で22mm以上もあるちな切土部において、とくに有効であると判断された。ちな土層の破碎が十分に行われる条件は、土壌硬度が山中式硬度計で20~23mm以上であるといわれている<sup>7)</sup>。

#### (2) ウイング付きサブソイラ及びリッパーによる土層改良

鳥取県東部の第三紀系水田は、土壌が重粘で基盤整備後は極めて排水不良となった。そこで1979年鳥取市中大路地区において、ウイング付きサブソイラにより、本暗きよに直交して間隔2m、深さ35cm、またリッパーは爪3本で爪の間隔1m、深さ40cmで土層改良を実施した。

表-2 サブソイラ処理による水稲収量の変化

区名	玄米重 (kg/10a)			同 比 率 (%)			
	1967	1968	1969	1967	1968	1969	
盛照	無窒素	530	531	533	97	99	91
	N6 kg/10a	545	539	587	100	100	100
	養分改善	620	596	603	114	111	103
土サブソイラ	無窒素	547	560	557	100	104	95
	N6 kg/kg	542	566	594	100	105	101
	養分改善	635	578	599	117	107	102
切照	無窒素	373	428	566	66	79	97
	N 10 kg	410	544	597	75	101	102
	養分改善	477	564	644	88	105	110
土サブソイラ	無窒素	323	369	559	68	68	95
	N 10 kg	442	563	591	81	105	101
	養分改善	508	609	669	93	113	114

注) 養分改善区は10a 当たり珪カル300kg, 燐100kgを施用した。

なお土壌は細粒灰色低地土, 灰色系 (佐賀統) に属し, 土性は LiC で作土直下に構造の殆んどない不透水層があり, 透水係数は $10^{-7}$  cm/sec のオーダーを示した。

リッパー及びサブソイラ施工後, 白色塗料を流しこみ, 土層内に形成された亀裂の状況を観察した。(写真 1, 2 参照)

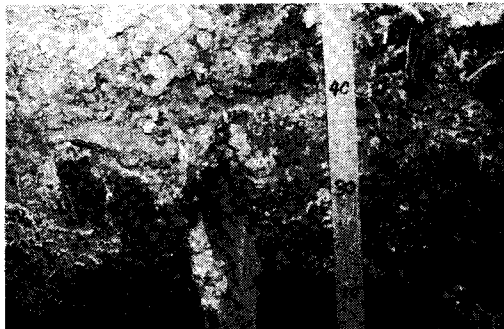


写真 1 リッパーによる土層内の亀裂 (白色塗料)

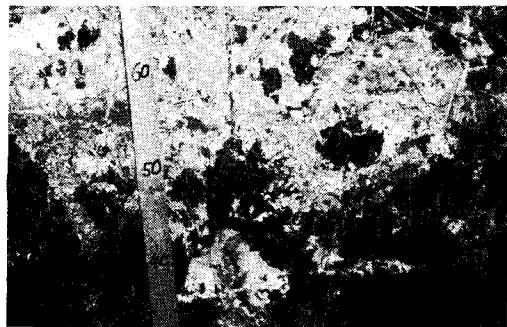


写真 2 ウィング付きサブソイラによる土層内の亀裂 (白色塗料)

リッパー処理では, 0~30cmの土層が耕耘されたように破壊され, 亀裂が多く発生したが, 30cm以下ではリッ

パーの爪の跡のみ穿孔され, 孔にまわりの亀裂は少なかった。またサブソイラ処理では, 0~35cmの深さまで扇型に破壊しながら, ウィングによる田面に平行な亀裂も形成され, かなり有効であった。

1作後の水の浸透能をみるため, シリンダー法によりインタークレートを測定した結果は表-3のとおりである。

表-3 リッパー及びサブソイラ処理による浸透能の変化

区名	試験開始前		1 作 後	
	積算侵入量 (mm)	$I_B$ (mm/h <sub>r</sub> )	積算侵入量 (mm)	$I_B$ (mm/h <sub>r</sub> )
無 処 理	$D=0.45t^{0.40}$	0.46	$D=1.5t^{0.05}$	0.01
リ ッ パ ー	$D=0.55t^{0.34}$	0.32	$D=2.0t^{0.53}$	4.5
サブソイラ A	$D=9.5 t^{0.72}$	34.1	$D=1.2t^{0.75}$	15.4
サブソイラ B	$D=0.6 t^{0.49}$	0.97	$D=2.2t^{0.71}$	21.0

無処理区ではベシクインタークレート ( $I_B$ ) は 0.01mm/hr で極めて小さかったが, リッパー区は 4.5 mm/hr と良好となった。またサブソイラ A (1978年大豆, 1979年水稲) 及びサブソイラ B (1978年水稲, 1979年大豆) はそれぞれ 15.4 mm/hr, 21.0 mm/hr で, 畑作物導入+ウィング付きサブソイラの効果が高かった。

水稲及び麦に対する心土破碎の影響をみると, 表-4のとおりである。

水稲の収量はリッパー区>サブソイラ区>無処理区の順であった。リッパー区は根重がもっとも多く, 根は淡褐色で活力があった。サブソイラ区は無処理区より根重は多いが, 根の色は褐色であった。

水稲栽培後に二条大麦を導入したが, 収穫期の調査では, サブソイラ処理区がもっとも良く, 次いでリッパー

表-4 作物の生育及び収量調査

区 名	水 稻		二 条 大 麦					
	玄米重 kg/10a	同 比 率	生育調査(5/14)			収 量		
			稈 長 cm	穂 長 cm	穂数本/m <sup>2</sup>	精麦重kg/10a	同 比 率	
無 処 理	459	100	58	4.5	320	142	100	
リ ッ パ ー	556	121	63	4.4	416	236	166	
サブソイラA	518	113	59	4.2	406	284	200	
サブソイラB	—	—	69	5.0	546	320	225	

区が良好であった。

表播き後の土壤水分の動きや、処理区30a当たりの暗きょ排水量の変化をみるため、テンシオメーターを土層中15cmの深さに埋設し、また暗きょ排水量は水道メーターで測定した。1979年12月24日～1980年1月2日について示したものが図-5である。

これらの結果によると、無処理区では33mm降雨後5日間はテンシオメーターによる土壤水分は、水柱高でマイナスを示し過湿であったが、リッパー及びサブソイラ処理により3日後にはプラスを示し、サブソイラB(サブソイラ処理後大豆栽培)がもっとも高く経過した。また本暗きょの吸水管の出口の排水量は、サブソイラA>サブソイラB>リッパー>無処理の順であった。

このように、鳥取県東部の第三紀系重粘質水田では、とくに基盤整備後、作土直下の20～40cmの土層が圧縮されグライ化しており、1mの深さに本暗きょしても、たて浸透が少ないので、この土壤に亀裂を入れ構造の発達した下方の酸化層と連結することが重要である。リッパー処理は有効であるが、ブルドーザーを要し農家が簡易に営農排水ができないが、ウイング付きサブソイラがあれば、35PS程度のトラクタで作業が可能であり、土

壤の破砕効果もかなり高い。

最近では振動型サブソイラが開発されて、より低い馬力のトラクタでも容易に心土破砕が可能となっており、鳥取県八頭郡河原町における試験結果でも、大豆は7%、スイートコーンで14%の増収が認められた<sup>8)</sup>。

また粘土含量が35%に達するような極めて重粘な鳥取市津ノ井地区では、5m間隔で深さ60cmにトレンチャーで溝を掘り、コルゲート管を入れたもみ殻サブソイラを施工したところ有効であった。この方法は極めて重粘な水田では実用化されている。

(3) 基盤整備田転換畑への畑作物導入による土壤改良  
基盤整備田転換畑として利用し、畑作物を導入しようとする時、排水不良のため水稻に対するよりも強い生育障害をうける。とくに重粘質水田では構造の発達が悪く、ち密な土層があるので、物理性の改良のために深耕や心土破砕等機械的な改良が適用されている。ここでは深根性の畑作物を導入し、植物根の伸長により土壤構造を積極的に発展させる方法について検討した。

そこで鳥取農試において、1978～1980年に実施した「中国地域における水田の多毛作技術確立のための営農排水技術と地力対策試験」の中から関連のある成果につ

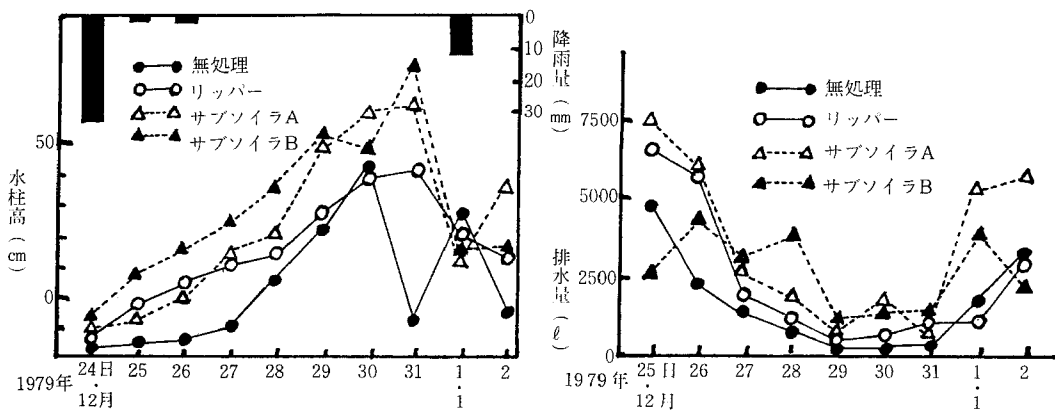


図-5 土壤水分及び暗きょ排水量の変化



表-5 根 系 調 査

区 分	根 重 (乾物g/0.5m <sup>2</sup> )			根 の 太 さ (mm)		
	0~10cm	10~20cm	20~30cm	0~10cm	10~10cm	20~30cm
ハトムギ	2.79	1.35	0.45	0.105	0.074	0.052
トウモロコシ	5.09	0.82	0.17	0.175	0.044	0.030
大 豆	1.31	0.36	0.08	0.062	0.028	0.013

いて紹介する。

試験地は鳥取農試で第三紀系の重粘土土壌よりなり、佐賀統に属し、粘土含量が25%以上で土性はLiCである。導入作物としてはハトムギ、トウモロコシ、大豆の3種類とし、1作後表層から深さ30cmまで10cmの厚さごとに0.5cm<sup>2</sup>の土塊をとり、根重を測定し、あわせて根の太さを測定し、平均値で示したものが表-5である。

根系分布調査では、大豆は10cm附近の土層に根重が多く、ハトムギやトウモロコシは10~20cmの部分にもかなりあり、20~30cmではハトムギの根重がもっとも多く、次いでトウモロコシで、大豆の根重はもっとも少なかった。根の太さも下層ではハトムギがもっとも太く、次いでトウモロコシで大豆の根はもっとも細かった。この結果、ハトムギが下層までもっとも大きい孔隙を作り出すことができた。

これらの作物収穫後における各処理区の浸透能をみるため、シリンドーインタークレートを測定した結果は表-6のとおりである。

表-6 畑作物導入による浸透能の変化

区 名	積算浸入量 (mm)	ベーシックインタークレート I <sub>B</sub> (mm/hr)
ハトムギ	D=2.9t <sup>0.82</sup>	54.7
トウモロコシ	D=1.6t <sup>0.82</sup>	32.6
大 豆	D=1.2t <sup>0.78</sup>	18.9
裸 地	D=1.6t <sup>0.77</sup>	27.1

これによると、ハトムギ区がもっとも浸透能が良好であり、ベーシックインタークレート (I<sub>B</sub>) は54.7 mm/hrで他の作物よりはるかに高かった。次いでトウモロコシ区が良好であり、I<sub>B</sub>の値は32.6 mm/hrであった。大豆区は浸透能は不良で、むしろ平均値では裸地区を下まわった。裸地区は畑状態にして放任してあるため、自然乾燥の影響を受けたものと思われる。

これらの結果より、作物の種類による土壌水の浸透能に対する改良効果は、ハトムギ>トウモロコシ>大豆の順であった。ちなみに北陸地方の重粘土では、トウモロコシよりもソルガムの方が根系が深いとされているようである<sup>9)</sup>。また転換畑にすることにより、土壌の構造は発達すると思われるが、その年数が長いほど亀裂が下層に向かって生成されると言われている<sup>10)</sup>。しかしなが

ら、深根性作物の導入により、転換畑における土壌の構造発達がいっそう促進される。

また転換畑における導入作物の組合せの相違によっても、土壌の碎土率、水中沈定容積、コンシステンシー、水の浸透能等にも変化があることが予想された。そこで1980~1983年の4年間、重粘土である鳥取農試水田において実施した「水田機能活用による総合栽培技術の確立試験」の中から関連のある成果について紹介してみたい<sup>11)12)</sup>。

処理区は何れも1980~1982年の3年連作で、1年ごとの作物の組合せは、①ハトムギ・イタリアン ②ナス・キャベツ ③大豆・小麦 ④水稻・小麦である。作土の碎土率について、1983年5~6月に生土について測定した結果は表-7のとおりである。

これによると、水稻・小麦では碎土率が極めて不良であり、1cm以下の土塊はわずか55.8%しかなく、水田利用では2毛作をしても碎土率が低いことが明らかであり、転換畑にした方が優位である。作物の種類では、大

表-7 土壌の碎土率 (作土)

作 物 名	土 壤 径 (cm)			
	1.0>	1~2	2~4	4<
	%	%	%	%
ハトムギ→イタリアン	0.9	8.3	19.9	71.0
ナ ス→キャベツ	0.5	12.1	24.6	62.9
大 豆→小 麦	0.0	7.5	20.2	72.3
水 稻→小 麦	1.2	18.4	24.5	55.8

豆・小麦及びハトムギ・イタリアンがほぼ同様の碎土率であり、ナス・キャベツよりも良好であった。

また同じ作物の組合せで、作土の水中沈定容積及びコンシステンシーを1982年5月11日に測定した結果は表-8のとおりである。

作土の水中沈定容積は、水稻・小麦>ナス・キャベツ>ハトムギ・イタリアン>大豆・小麦の順であった。一般に水中沈定容積の小さい方が畑地化の進んでいる指標となるといわれているが<sup>13)</sup>、今回の試験結果でも明らかに水稻と畑作物跡とは相違がある。また畑作物の種類によっても値が異なることは興味深いことである。水

表-8 水中沈定容積及びコンシステンシー(作土)  
(1982年5月11日)

作物名	水中沈定容積(ml/g)		コンシステンシー		
	3日	14日	液性 限界	塑性 限界	塑性 指数
			%	%	
ハトムギ→イタリアン	1.58	1.64	56.6	34.3	22.3
ナス→キャベツ	1.78	1.81	58.6	34.9	23.7
大豆→小麦	1.55	1.58	53.2	33.1	20.1
水稲→小麦	1.83	1.89	58.2	32.0	26.2

田を畑地転換することにより、親水性コロイドの脱水が進行し疎水性コロイドが増加して、液性限界の低下と塑性指数の減少がみられると言われている<sup>13)</sup>。

表-8が示すように、水稲・小麦では、作土の液性限界及び塑性指数とも、他の転換作物導入区よりも明らかに高く、また畑作物の種類では、水中沈定容積の順位と同様で、大豆やハトムギ跡地の方が作土の構造が良好となった。

同じ処理区において、1983年5～6月に浸透能をみるため、シリンダーインタークレート等を測定した結果は表-9のとおりである。

この結果では、処理区における $I_B$ はナス・キャベツ3年連作後が121.4 mm/hrでもっとも良好であった。しかしながら、フザリウムが急激に増加し、B/F値が低下する等、土壤微生物相は不良となった。ハトムギ・イ

表-9 輪作体系の相違による浸透能の変化

作物名	積算浸入量(mm)	ベーシックイン テークレート	
		$I_B$ (mm/hr)	
ハトムギ→イタリアン	$D=9.7t^{0.61}$	43.7	
ナス→キャベツ	$D=11.3t^{0.73}$	121.4	
大豆→小麦	$D=31.6t^{0.35}$	13.9	
水稲→小麦	$D=9.0t^{0.37}$	4.9	

タリアン区の $I_B$ は43.7 mm/hrでこれに次ぎ、大豆・小麦区は13.9 mm/hrであったが、最初の1分間では大豆跡が31.6mmの浸透量でもっとも多かった。水稲・小麦では、春季の非かんがい期においても $I_B$ は4.9 mm/hrで最低であった。

このように、水田を転換畑にすることにより、土壤構造が改善されていることが、土壤物理性の諸項目の測定により推定された。また導入作物の根により、土壤に積極的に孔隙をあげ、徐々にあるが着実に土壤構造が改善されていることが認められた。

#### 4. おわりに

水田の基盤整備は大区画ほ場整備を中心として実施され、大型機械化営農が可能となり、労働生産性の向上に大いに貢献している。

しかしながら、土壤構造の観点からみると、むしろ基盤整備に伴い土壤が圧縮をうけ、従来長期にわたって発達して来た土壤構造が破壊されている場合が多い。土壤構造は土壤肥沃度の鍵であるといわれており、水と空気の動きを支配する土壤構造の意義は極めて高く、作物の生育にとって大きな影響を及ぼしている。

したがって、土壤構造を発達させるためには、深耕や心土破碎を実施したり、転換畑にして深根性作物等の導入をはかるなど、各種の土壤改良法を組合せて、作物に好適な土壤環境を造成することが必要である。

#### 引用文献

- 1) 上田弘美：基盤整備水田の土壤変化と改良に関する研究，鳥取農試特研報，4，(1981)
- 2) 久津那浩三：水田基盤整備の現状と問題点，近代農業における土壤肥料の研究，第1集，7-11，(1970)
- 3) 古木敏也ほか：農土試報，8，129-160，(1970)
- 4) 上田弘美ほか：基盤整備に伴う土壤環境の変化に関する研究(第10報)，水田土壤の透水性の変化について，土肥学会要旨集，13，3，(1967)
- 5) 国分欣一ほか：圃場整備に伴う水田の排水及び土壤改良に関する研究，農事試報，32，93-135，(1980)
- 6) 寺沢四郎：水田土壤群の物理・工化学的特性に関する研究(VI)，農土論集，33，41-48，(1970)
- 7) 根岸久雄：重粘土水田の土層改良と用排水組織に関する研究，土壤の物理性，31，29-33，(1975)
- 8) 下田健之介ほか：強粘質基盤整備田における振動型サブソイラの効果，土肥学会要旨集，29，110，(1983)
- 9) 星野正生：水田転換畑の飼料作物栽培 (1)北陸地域における転換畑の飼料作，農業技術，33，No.7，225-303，(1978)
- 10) 竹中 肇：転換畑における土壤水分と土壤構造の変化，土壤の物理性，31，24-28，(1975)
- 11) 下田健之介ほか：強粘質水田転換畑における理化学性の変化について，(第1報)，土肥学会要旨集，28，113，(1982)
- 12) 鳥取農試：土壤肥料関係試験成績書，(1980-1983)
- 13) 農業土木学会：汎用耕地化のための技術指針，71-72，(1979)

質疑応答

座長 上田さんは、基盤整備によって重機の転圧が土の構造と破壊しているということ、さらにそれを観察するために、土壤断面調査・ポット試験を行い、さらにその改良としてリッパー・サブソイラーの効果を転換畑でいろいろな作物で試された結果を述べられました。御質問をお願いします。

久保田（農環研） 基盤整備は、作土の孔隙減少がpF 2～2.7という微細部分に及んでいるが、このような変化は基盤整備で一般に生ずることですか。土壤間差についても教えて下さい。

上田（鳥取農試） 粘土含量23～25の土壤で、特に水分が多い時にねりかえしたような場合におこるようです。これには還元による鉄、マンガンの形態変化も関与していると思います。土壤間差ですが、火山灰土壤ではこのことはあまりはっきりできません。

金子（千葉県農試） ナス→キャベツ作付体系においてベーシックインタークレートが高くなっているが何によるのですか。

上田 御存知のように、ナスは人間の背ぐらいになり地上部、地下部ともに非常に大きくなります。そのため亀裂・根のあけた穴がインタークレートを大きくしたと思います。

# 機械耕うんによる土壌物理性の改良 農業機械化研究所研究第1部

唐 橋 需

Improvement in physical properties of soil by tillage

Motomu KARAHASHI

1st Research Division, Institute of Agricultural Machinery

## 1. はじめに

耕うん作業は、soil preparation for seeding,つまり播種床造成のために行うのが基本であり、そのための方法としては、プラウで“起こす”ことを根幹とし、ハローで碎土・整地を行う耕起・碎土・整地システムが代表的なものである。ところが、我が国ではロータリで耕起と碎土を同時に行ってしまう方法が一般化した。一方、世界的に見ると、近年サブソイラ等で地中に亀裂を入れる方法が重要な耕起方法になってきている。したがって、現在では、土層を破碎したり、持上げて返したりする多様な耕起方法と、種々の碎土方法の全体を、つまり、広義の意味に「耕うん」という表現を使ってよいものと考えられる。

以上のような耕うん作業によって、播種に適し、かつ根の伸長等、作物の生育に適した状態に土壌を調製するのであるが、耕うん方法の研究について見ると、作業前の土壌物理性等の圃場条件と作業に要したエネルギーの関係を中心として、これに土壌の反転または作物残渣の埋込み、あるいは砕き方といった処理の結果を評価基準に加えるというのが大半であり、耕うん後、特に時間を経過した時の土壌物理性の把握については余り努力を払ってこなかったと言っても過言ではあるまい。今後は耕うん効果の持続性という面から見直してみる必要があると考えるのであるが、ここでは各種の耕うん作業によってどのような処理結果が得られるかについて述べることにする。

なお、土壌物理性の把握のために農業機械の分野で一般的に行っている項目は、土壌密度・含水比・三相分布の測定と円錐貫入抵抗・リングせん断抵抗の測定で、前者のために深さ30cmまで連続して採土することのできる手動式のコアサンブラが筆者等によって開発されたところであり、後者のためには当研究室で改良開発された

SR-2型土壌抵抗測定器が使われることが多くなっている。また、碎土度合の測定には一定網目間隔（当室では1, 2, 3, 4, 5, 7, 10cm）の篩を使用し、重量分布割合と平均土塊径で表示しているが、水田を対象とする場合には、播種床に対する適性の大体の目安になるという意味で、2cm以下の割合を碎土率と呼ぶことが慣行化してきている。ただし、畑の場合には、1cm以下の割合で表現するのが良いとする声が多いようである。

## 2. ロータリ

我が国では最近、浅耕化が大きな問題になっている。各種の資料を総合すると、水田作土深は、昭和30年代から40年代にかけてはむしろ増加して14~16cmであったものが、昭和50年代になると減少しており、50年代半ばには12~14cmになっているようである。ロータリだけの耕うんの場合は耕深によって作土深がほぼ決定されと考えられるので、確かに耕深は浅くなっているようである。山形県農業試験場の実態調査結果<sup>1)</sup>によると、我が国で台数の最も多い20PS以下の大きさのトラクタの場合に最も問題が大きく、碎土を高めて速く作業しようとする結果、耕深の平均が約12~13cmとなっている。しかし、根本的には、栽培技術全体の仕組みとして、即ち、13cm農法が出来上がっているのであり、これに適するものとしてロータリが使われているのである。したがって、耕起と碎土を同時に行うためエネルギー要求量の著しく大きいロータリで、15cm以上の耕深を得、しかも能率を下げないで作業しようすればトラクタのかなり的大型化が必要なのであって、現在の使用トラクタを前提とするなら何らかの新しい耕うんシステムが必要になる。

さて、ロータリによる耕うん後の状態は、碎土とわら刈株等の埋没の程度で測定される。前者は耕うんピッチ（爪の打込み間距離）と土壌条件とによってほぼ定ま

\*農業機械化研究所

る。土壌条件としては土性と含水比が大きな要因となり、図-1に示されるように、一般に砕土と所要動力の

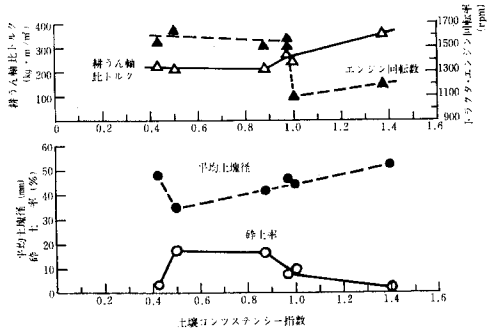


図-1 圃場水分条件とロータリの砕土性能<sup>2)</sup>  
(火山灰壤土, 水田転換初年目, 耕うんピッチ 9~10cm, 作業速度0.5m/s)  
〔本庄等, 昭和59年〕

両面から見て塑性限界付近が耕うんに適した状態と考えられる<sup>2)</sup>。耕うんピッチは、当然小さくなるほど砕土がよくなる。その一例を図-2に示した。この図で表層部分の平均土塊径が全層の場合より大きくなっていることからわかるように、細かい土塊が下層にやや多くなる傾向が認められる。わら類の埋込みは、適当な耕うんピッチであれば、耕深を最低12cm以上とすることによって、かなり良く行うことができる<sup>3)</sup>。ただし、表-1<sup>4)</sup>に示されるように、表層から下層まで大体均一に入った状態となる点がブラウによる埋込み状態とは著しく異なる。

以上のような砕土と埋込みの結果、ロータリ耕うんは土層の攪拌混合と膨軟化をもたらす。この外、耕うん爪の切削面の滑りによって、また、上からたたく作用も加わって、数年で耕盤が生ずるといことが聞かれる。

### 3. レーキ付アップカットロータリ

従来一般に使用されてきたロータリは、進行方向に向かって爪が打ち下ろすダウンカット式のものであり、それについての特性は前述したとおりである。この普通の

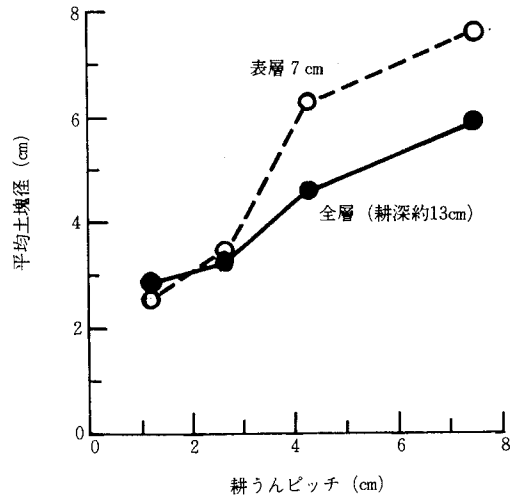


図-2 ロータリの耕うんピッチと砕土状態  
(圃場条件: 灰色低地土, SiC, 水稻跡, 含水比45~47%)  
〔農機研, 昭和57年度成績より作成〕

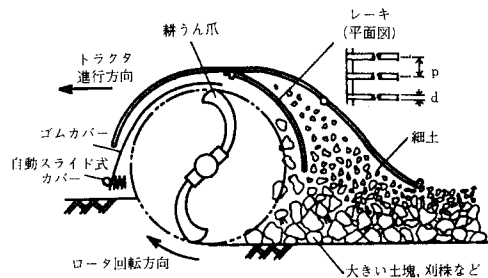


図-3 レーキ付アップカットロータリの構造と作用  
注) レーキ棒のピッチp=35~38mm, 直径d=8~10mm。

ロータリとは耕うん爪の回転方向を逆にして、ロータの直後に格子状のレーキを設けたのが図-3のレーキ付アップカットロータリである。このロータリの特徴は、レーキに耕うん土を衝突させることによって、レーキの

表-1 耕うん後の麦稈のすき込み状態<sup>4)</sup>

試験区名	耕深 (cm)	埋没率 (%)	埋没率の内訳 (%)		
			表層	上層	下層
完全すき込み区	16.0	100	0	0	100
ロータリ精耕区	14.8	91.9	20.7	38.0	41.3
ロータリ粗耕区	16.5	89.0	29.8	44.6	41.8
表層耕区	6.2	65.3	95.0	5.0	0

小麦わら (含水率35%), 麦稈量 (乾物30kg/a, 切断長57mm, 堆肥土 (水田跡持込み), 耕うんピッチ (cm): 精耕区4, 粗耕区8 (九州農試水田作機械化研, 昭和51年度試験成績)

表-2 レーキ付アップカッターロータリと通常ロータリの性能比較

項 目	機 種	レーキ付アップカッターロータリ	通 常 ロ ー タ リ
表 層 碎 土 率 (種子の発芽に重要な関係)		水田転換1年目で 50~90% (通常ロータリの約2倍)	同条件では 20~50%
稲 株 埋 没 率 〃 露 出 率		95~99% 1~5% (通常ロータリの約1/6)	75~90% 10~25%
耕 う ん 所 要 動 力		通常ロータリより多少大 けん引抵抗でトラクタを 引張る	トラクタを押す方向 に力(推力)が働く

間隙を通過しない粗い土塊や刈株を先に落とし、その上へレーキの間を通過した細かい土塊を落とすという作用を行うことである。したがって、雑草やわら、刈株等の埋込み性能に優れ、下層ほど粗い土塊になるという耕土層の構造とすることができる。その性能は、多くの試験結果をまとめると、表-2のようになる。普通のロータリよりは所要力が大きくなるが、表層碎土と作物残渣埋込み性能の良さが評価されて、当研究室による改良開発後間もなく普及するとともに、ロータの回転方向を変えるだけで普通のロータリにもレーキ付アップカッターロータリにも使えるようにした正逆転両用ロータリがメーカーによって開発されて普及している。

一方、表層に細かい土塊を集中させるため、粘質土壤で、播種後の降雨時期とその後の乾燥によっては、土膜が発生して大豆等の出芽障害を起こすことがあるという、新たな問題も生じている。

なお、普通のロータリよりも更に耕土層が膨軟になるので、播種時には鎮圧する必要がある。ただし、このような膨軟さも、降雨の少ない条件ではかなりの期間持続される<sup>5)</sup>ものの、降雨の多い条件下では耕うん後1ヵ月後の固相率は普通のロータリ区と差がなくなるばかりでなく、耕うん前の転換畑のうね部分より土層がしまることがあった<sup>6)</sup>。

#### 4. 深耕ロータリ

これは普通のロータリと同じ耕うん方法であるが、最大50cm回り迄耕うんすることができる。しかし、作業速度を増大させると機体が浮上がり、急速に耕深は小さくなる。図-4にその特性を示した<sup>7)</sup>。トラクタのPTO軸回転速度を高めるなどしてうまく使うと、耕深20cm回りで比較的能率的な作業を行える可能性のあることがこの図から知られる。

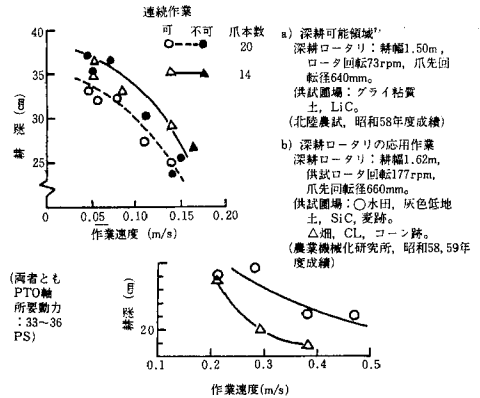


図-4 深耕ロータリの作業特性

#### 5. プラウ

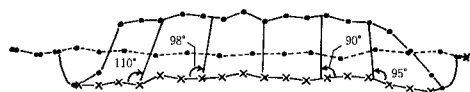
普通プラウと言えばボトム (はつ土板) プラウのこと  
で、土層をほぼ完全に反転して作物残渣等を下層に埋没  
させることができる点で大変優れているが、大きなけん  
引力を要する等のため我が国に適する場面は少なかった。  
また、耕起後の溝にトラクタの片側車輪を入れて  
走る溝曳きの作業方法となるため、硬い耕盤が生ずる。  
その様相を調査した表-3の結果によると、土性によっ  
て発生程度が異なるが、大型トラクタのみならず、小  
型トラクタによっても生ずることが明らかである<sup>8)</sup>。

これに対して、最近注目を集めているのが駆動ディス  
クハロー型プラウである。これは、シングル (単列) デ  
ィスクハローの形状をしており、作業幅が大きいが、デ  
ィスクをPTO軸動力を使って強制回転させることでけん  
引抵抗が小さくなるため、小型トラクタでも輪距より  
大きな作業幅のプラウを引張ることができる。したがっ  
て能率的な耕起作業をできるだけでなく、未耕起地をト  
ラクタが走る丘曳きの作業となるため、また、ディスク  
周縁の刃が立って削る作用のため、耕盤を作り難いと考

表-3 トラクタ耕と馬耕における壛溝底下の比貫入抵抗<sup>8)</sup>

試験地	土性	区別	トラクタ導入年数	トラクタの大きさ HP	プラウの耕深 cm	比貫入抵抗 kg/cm <sup>2</sup>	備考
十勝	火山性壤土	トラクタ耕	9年	9.8	18~21	6~8	9年間の影響 心土が固いため 1年の影響
		馬耕	—	—	21	3~5	
	埴壤土	トラクタ耕	4年	36.5	18	6~8	
		馬耕	—	—	14	5~8	
美幌	埴壤土	トラクタ耕	4年前に	36.5	21	5.5~8	4年間の影響
		馬耕	心土耕	—	15	2.5~4	
石狩高岡	壤土	トラクタ耕	初テスト	58.5	24	6~12	1回耕の影響
		馬耕	—	—	21	4.5~6	

(常松 栄等, 1967より作成)



キヤング角25°、耕幅194cm、耕深：平均12.9cm、最大約18cm、作業速度0.56m/s、平均けん引抵抗686N (70kgf)、滑り率1.1% (トラクタ：50.7kW、69Pa、2.64t)、平均PTO軸所要動力28.0kW (38.1PS)、平均総所要動力28.4kW (38.6PS)、うね高さ約35cm。

図-5 駆動ディスクハロー型プラウによる耕起作業結果 (水稻跡, 灰色低地土, SiC, 含水比42~43%, 液性指数0.25~0.30, 0~15cm平均小型円錐貫入抵抗814kPa, 8.3kgf/cm<sup>2</sup>)  
〔農機研, 昭和59年度土一機械系研究委員会成果より〕

えられる。しかし、図-5に示したように、土壌が硬いと回転するディスクによっても食込みが不足して耕深が不十分となったり、またツーウェイ（寄せうね）式の中割部が浮いて耕盤が中高の波状を呈したりする外、壛の反転程度が90°~110°にしか過ぎず、刈株とわらのすき込みが不完全である。ただし、れきが斜めに立っていることで乾燥が進むと期待されている。また、ロータリとボトムプラウの中間的な反転作用が、畑などの地力の向上に適する可能性を秘めていると思われる。

## 6. 新しい耕うんシステムの探索

いま米国では、地表面に作物残渣を残した状態（無耕うん）で心土破碎機状のものを通しつつ、その破碎条の上に播種していくという減少耕うんシステムが、土壌流亡の防止に効果が高い上に、沿岸地方では排水性が向上して収量が増加する等の長所があって、かなりの地域に導入されつつある<sup>9)10)</sup>と言われる。我が国では、深耕は、一方では排水性の向上をもたらすことで増収に寄与

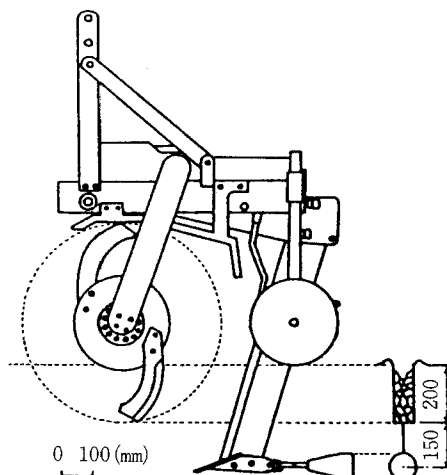


図-6 爪打込み同期式溝切りロータリ付振動弾丸暗渠せん孔機

〔主要諸元〕

全重160kg、弾丸最大直径80mm、標準振動数9 Hz、標準振幅32mm、爪先回転径650mm、切削幅50mm。

すると推察できる。当研究室では、水田転換畑における排水促進の一層の向上を行わしめる方法として、図-6の構造の作業機と施工法を開発してきたのであるが、今後はこのような土層処理の方法を前述のような耕うんシステムに組入れることを試みようとしている。マリツェフ農法(1958)<sup>11)</sup>によると、完全反転の耕作方法には欠陥があるのであって、数年に1回、はつ土板なしプラウで作土を反転しない深耕を行い、毎年の収穫を終った後に浅耕しておくのが地力増進と水分保持のために最適である。我が国でも、千葉県農業試験場でプラウとロータリによる耕うんシステムが野菜の生育と収量及び土壌

に及ぼす影響についての7年間の試験が行われている。このような長期にわたる広範囲な土壌と作物、気象条件に対する試験によって、数年サイクルの単位で見た適正な土壌管理方法を確立することが、今最も求められている課題であると思う。

## 7. 結 語

耕うん作業は、現在では土壌処理に係る幅広い意味に解されるべきであるとの観点に立って、それがもたらす土壌構造の変化を主体にして解説した。しかし、この分野の研究では、耕うん後、特に時間の経過に伴う土壌物理性の変化の把握は余りなされていなかった。今後は耕うん効果をその持続性の面から見直す必要があり、その中から我が国における土壌と作物と気象条件に適した新しい耕うんシステムが生まれるであろうと考える。

### 参 考 文 献

- 1) 深澤昭吾・榎谷精治・小南 力・安達真道：水田耕土確保についての一考察，農業機械学会東北支部報31，1～4，1984
- 2) 本庄弘幸・富田 貢・沢村宣志：水田転換畑における耕うん・碎土作業について，第1報圃場水分条件とロータリの碎土性能，北農，51，1，1～13，昭和59年
- 3) 農事試験場作業技術部作業技術第1研究室：藁稈類・植物残体の処理法，昭和51年度特別研究「水稲・裏作物による作付体系と高位生産技術に関する研究」推進会議資料，135～138，昭和52年
- 4) 九州農業試験場作物第1部水田作機械化研究室：藁稈類の処理法，同上，147～151，昭和52年
- 5) 伊澤敏彦・後藤隆志・金須正幸・藤井清信：土壌物理性の改善に関する研究，農業機械研究所研究成績55-2，39～43，昭和56年
- 6) 藤井清信・後藤隆志：同上，同上56-1，39～42，昭和57年
- 7) 北陸農業試験場経営土地利用部機械化研究室：重粘土壌の耕うん法（深耕ロータリ耕うん，昭和58年度北陸農業試験場研究成績・計画概要集—機械作業—，2，昭和59年
- 8) 常松 栄・吉田富穂・松居勝広・池内義則・南部悟・宮本啓二：トラクターによる踏圧現象に関する研究（第1報），プラウ耕時の踏圧，農業機械学会北海道支部会報第9号，126～134，1967
- 9) C. Hammond, J. T. Reid, W. E. Seigler : Seedbed Preparation behind Row Subsoilers, Trans. ASAE, 24(4), 897～901, 904, 1981
- 10) E. D. Threadgill : Residual Tillage Effects as Determined by Cone Index, Trans. ASAE, 25(4), 859～863, 867, 1982
- 11) 亀井建三・倉田 貞 訳編：新しい耕作法—マリツェフ農法，理論社，1958

### 質 疑 応 答

諸遊（農環研） アップカットロータリで細かい土塊が地表付近に集まるが，降雨後固くなるのは川里圃場の土壌の例ですか。

唐橋（農業機械化研） 川里土壌では強いたまり水が2回あり，春起こしの状態よりも固くなってしまいました。なぜ土が固くなるのかというのには，やはり雨の作用とその後の乾燥収縮が考えられますが，このへんはむしろ教えていただきたい。アップカットというのは表面に細かいものを集めますから，大雨でなくても雨がきて乾燥しますと特に粘土質土壌では表面がかちかちになる場合があります。このような状態になると，例えばダイズなどは種子を持ち上げきれなくてちぎれてしまうような発芽障害の問題もできます。これにつきましても細かいものばかりでなく粗いものも混った方がよいといった事をいっておられる方もいます。そういった土膜の問題もアップカットにはあります。



# 総 合 討 論

座長 古畑 哲 (農環研) ・長田 昇 (三重大)

座長 寒いですから討議の方は熱くやっていただきたいと思います。今日、6人の方にお話し願ったわけですが、座長団としては、問題を2つにしばって討議を進めていきたいと思っています。1つは構造の改良に関する問題としてヒドロキシャルミニウムの施用効果であるとか、上田さんがお話しいただいた基盤整備水田における土層改良、あるいは作物導入の効果、唐橋さんのお話しの機械耕耘による効果等、これらを一まとめにして効果の持続、適応範囲に対する留意点をめぐって討論したらどうかと思います。もう1つは、構造改良の評価に関する問題であり、エアレーションと作物生育の関係でO.D.R.の話、中野さんの方から出された易耕性の問題、そして新垣さんのお話の力学性に関する問題点についてであります。さらに、排水・保水、毛管伝導性改良についてまでいければ良いと思います。それでは構造の改良問題からお願いします。

軽部 (茨城大) 和田先生にお聞きしたい。私の経験ではヒドロキシャルミニウムイオンの溶液を乾燥させても、水を加えると溶けてしまうのに、それを粘土に混ぜてから乾燥させると水を加えても粒子間結合の効果が残る。それは粘土によるヒドロキシャルミニウムイオンの特異吸着のためか。またヒドロキシャルミニウムを粘土に加えてから乾燥させた場合のA1間の結合のしかたと、溶液中にポリマーとしてある場合のA1間の結合のしかたの違いについて教えていただきたい。

和田 (九州大) はじめの方の御質問はその通りだと思います。ですから重要なのは粘土が共存していて吸着がおこるということではないかだと思います。ヒドロキシャルミニウムイオンは非常に強く粘土に吸着されていて、普通の陽イオン交換ではおきかえにくい。ですから今おっしゃったような表現でいけば、水に溶けない形に確かになっております。そういうことで乾燥すると安定な粘土粒子集合体ができることが、圃場実験でも確かめられています。ただし、これは地点によって効果の多い所と少ない所がありますが、かなり一般にいえるのではないかと思います。圃場実験は条件が複雑ですので、室内実験でヒドロキシャルミニウムで結合させた粘土粒子集合体が規定された条件でどれくらいもつのかを調べておく必要があります。しかし現在のところこの情報は非常に不足しておるのではないかと思います。

久保田 (農環研) 有機高分子の団粒形成能は重合度が2000位と高いものが効果があるが、ヒドロキシャルミニウムは13位と低い。したがって団粒化に荷電を殺す凝

集作用はわかるが、その他高分子剤と同様の架橋作用はあるのでしょうか。また、実際に使う場合、中野さんのデータではトウモロコシ収量は逆に低かったですね。おそらく酸性障害のようなものが出てくるから土質で使う場合は当然石灰中和するわけですが、そういうときに須藤先生がおっしゃったようなギブサイト化その他で効果がなくなるようなことはありませんか。

和田 普通のポリマーと比較してのお話ですがこれは我々の方でも吸着されたものがどれくらいの大きさに重合しているのかわからないのです。ですが、溶液の中から反応するものについては、溶液中のポリマーイオンというのがどれくらいのものかということは幸い最近研究が進展したようです。従来はポリマーの具体的な重合度がわからなかったのがヒドロキシャルミニウムでは13位のものが多くなってきた。そうしますとあまりポリマーでない方が粘土粒子間の架橋効果には好都合なのではないかと私は逆に考えているのです。このように小さいポリマーイオンも、例えばスメクタイトの場合ですとイオン交換の方の仕事からいっても層間にどんどんはいっていきます。ですからあまり大きいものにならないのによく結合がつくれるということがむしろ普通のポリマーよりいいのではないかと思います。ただ、うちではあまり有機物はやっていませんが安定性からいいますと、コロイド滴定等に使われているグリコールキトザンというのがありますが、これは大きなポリマーですが、結果的に非常にヒドロキシャルミニウムイオンと似た、凝集効果ではない、かなり粘土粒子と結合している、透水性を持続させる効果がでてまいります。そのような比較をしてみますと、どちらが有効かということは一概には申せないと思います。例えばエッジにくっくなどという意味からはこれくらいの大きさのほうが都合がいいのではないかと私は思っています。

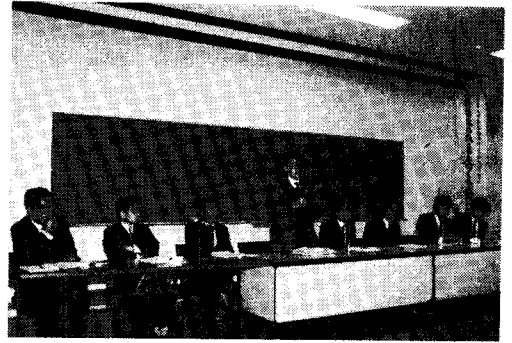
後の方の質問ですが、実際には酸性障害がおきるわけですから、もちろん多量に加えた場合にはどうしても石灰中和は必要になります。それをどの段階でやるかというのが実際の施用の場合に大きいのです。これは施用の仕方とも関連しますが、現在我々が実験しているのは2つの施用方法を考えています。中野さんや、白石さんがおやりになったのは、だいたい畑状態に乾燥したところにヒドロキシャルミニウムの比較的濃い溶液を噴霧するというやり方でしたが、混ぜる効率からいうと水田での代掻きのように混ぜた方がいいと思ひまして、試験場にもお願いしてやっていただいております。その時に中和

の効果を見る上では、代掻き式でやった方が試験がやりやすいのです。そこでヒドロキシアリウムを施用した直後に中和するのと、ヒドロキシアリウムでできた塩を落としてから中和する場合の2つを比較しています。直後に中和すると効果が非常に落ちますね。ですから、やはりある程度酸性の条件下で陽荷電のはっきりでたヒドロキシアリウムを使ってやるのが凝集効果を出すうえでは必要ではないかと思えます。作業的にいうと一度にやれば楽だと思ったのですが、やっぱりなかなかうまくいかないみたいで少なくともすこしおいてからやるということが必要ようです。

須藤(茨城大) ヒドロキシアリウムの効果では黒ボク土や赤色土に有効といわれますがその辺の事情をお聞きしたい。また、土壌中の amorphous のケイ酸とヒドロキシアリウムとの関係はどうなりますか。

和田 赤色土の場合は、ここで申しあげるのは主としてオーストラリアのウェイト研究所でやられたものですが、クラスノゼムというのが非常に酸化鉄含量の高いもので構造がよろしいのです。それで研究のやり方としては私が少々乱暴ではないかと思えますが、これは久保田さんもよくご存知ですが、酸化鉄を抽出する処理をいたしまして、そして例えば透水性がどう変化するかとか、他に1つ2つなんか物理性の指標になるものをとっていたと思いますが、そういう化学処理をした時に物理性がどのように変化するかをみているわけです。その時に酸化鉄を抽出する処理というのはだいたいアルミもよく溶かすのですが、鉄を溶かさずにアルミだけを比較的好く溶かす pH 4 の塩化カルシウム溶液で処理すると物理性がよくなったものが非常に悪くなるのです。そのようなことで、赤色土でも酸化鉄よりむしろ量的には少ないがアルミニウムが粘土粒子の結合に対して有効に働いているのではないかと報告されています。

これまでの粘土鉱物の研究からいいますと、土の中には非晶質な粘土があるとお考えかもしれませんが、非晶質な粘土というものがある程度ははっきりした実体をもって、ある程度以上土壌中にあるというのは土壌の種類としては限られていると思います。ですから非晶質な粘土鉱物というのは確かにいろいろな土ででてくる可能性があると思いますが、あきらかに1つの鉱物実体としてある土壌はやはり黒ボク土であるとか、最近黒ボク土と非常に似ていることがわかったポドゾルのB層のような特定の限られた土壌となります。さらに玄武岩が風化したような土壌、これは異論があるかもしれませんが、これにはある程度 amorphous なケイ酸塩・粘土があると思えます。しかし我々が問題にしているスメクトタイトが多い水田の場合ですとケイ酸は、非晶質ではあるかもしれませんが、ケイ酸塩としては可能性が少ないのではな



いかと思っております。

座長 次に基盤整備水田、あるいは機械耕耘と土壌構造との関係に討論を進めたいと思えます。

久保田 アップカットロータリとダウンカットロータリで培地の土塊分布が異なるが、それぞれの分布状態が培地のどういう場面に適するの、またどういう作物に適するのかなどの情報はありますか。

唐橋(農業機械化研) 機械を造る方が得意でして栽培は苦手なものですから今おっしゃったようなデータは持ちあわせていません。播種との関係でやっているのが研究の実体で作物栽培全体を通してみた中でつかみ方があまりない。アップカットの場合は種をまく前に鎮圧するような形にしないと毛管水が切れるような中間層ができます。そこではワラや雑草がはいったり土塊分布が悪くなったりして、非常に膨軟になります。しかし鎮圧も場合によっては平滑ローラーでただ平らにだけしますと、今度は土膜ができやすくなります。もう少しプラウについて渡辺さんに補足していただきます。

渡辺 先程唐橋さんがおっしゃったようにプラウは溝びきといいまして、自分でおこしていった溝に車輪を落して、次のうねをおこしていくということで犁底を踏み固めてしまう問題があります。それで長年同じ深さでそのようなおこし方をしておくと、犁底盤というよりトラクターによる踏圧層ができます。現在北海道などでは少しずつ深くおこすようなやり方をとっています。15年くらい前までは20cmを普通耕といいましたが、現在は30cmをいうようになってきました。そのために最近ではトラクターも80~100馬力、場合によっては130~150馬力というような巨大なものまであって、30~35cmという深起しも普通になってきたわけです。

それからもう一つの方法としてプラウの後にサブソイラーをつけてトラクターで踏み固めたところを耕していく方法があります。親プラウが25~30cmおこしタイヤで踏み固まった分を3~5cmおこすわけです。さらにプラウとサブソイラーの交互利用もあります。ウィング付きのサブソイラーで芋をほりとり翌春プラウでおこすように利用されています。

また連作障害に利用された例もあります。その場合はサブソイラーを約70cm入れ、その後50cm位を耕す2段混層の方法をとります。そのことによってフザリウムをはじめ連作障害のもろもろのものが解決することがあり、最近そういう意味でもブラウ耕が見直されつつあります。

**座長** この耕耘をめぐる問題は農研センターを中心にノーティレッジがいいのか、ミニナムティレッジがいいのか、あるいは深耕がいいのかということの研究会を持っていますので、参考にしていただければと思います。

次に2番目の評価について移りたいと思います。土壌構造を作物生育にとって都合のいいように作りかえていくのが我々の目標ですが、その接点として、作物の根系に酸素を供給するのに何をもちて評価すればいいのかというのでいろいろな試みがなされています。この点から阿江さんはO.D.R.による評価方法についてお話しがありました。そのような構造を作っていくには間隙構造が主になりますが、粘質土壌の場合にはこのことは易耕性に問題であり、中野さんは塑性限界とpF 1.8の比をもって説明されました。さらに新垣さんからは、そういった間隙構造を形作っていくために骨格構造としての団粒をとりあげ、その力に対するふるまい・応答についてのお話しがありました。このことをふまえて、我々は構造をどのように評価したらよいか御意見をいただきたいと思っています。

**安富（茨城大）** 中野さんにお聞きします。お話しの内容から易耕性向上には塑性限界/pF 1.8含水比の値を大きくすればよいと考えられます。一般に風乾によってこの値を大きくすることができるといいますから、易耕性の改善には表土扱的に表面の乾燥を進めることが効果ある方法と考えてもよいですか。

**中野（四国農試）** 重粘土の特徴としてはそのようなことも考えられるかもしれませんが。湿土でも春、雪の溶けた後表土だけ乾きますから、これは浅くならんとかおこせる。しかしこれをやると表面の固い層が破壊されますから播種機械ははいれません。したがって地表層を乾かしてというのは実際の耕作では無理だと思います。

**安田（農環研）** 阿江さんのお話しでは、酸素不足による根粒に対する障害がダイズの生育を不良にしているということでしたが、これは根と根粒の両者による酸素の競合があってそのために根に対する酸素の絶対量が不足してくる結果ではないかと考えます。

作物根に対する酸素供給の評価法として酸素は水膜を通して拡散されるわけで、その意味でO.D.R.は一つの良い方法だと思います。では、O.D.R.を高めるにはどうしたらよいかということになりますが、それは排水を良くするとか、粗大有機物投入などによって粗孔隙を増大

することだと考えられます。粗孔隙を20～25%以上に保つならば結果的にO.D.R.は30以上に高まるものと考えております。なお黒ボク土で特に酸素濃度が低下したということですが、それは土壤空気ではなくて、水膜中の酸素濃度が低下したということになります。すなわち黒ボク土は同一地下水位でも毛管上昇量が多く、そのために粗孔隙が他の土壌よりも少なくなり地表面からの酸素供給も落ち、しかも土壤呼吸が大でガス交換が少なかった面もあると判断されます。

**阿江（中国農試）** 私が言いたいことをよく理解しておっしゃってくれたことが1つあります。確かに粗孔隙を増せばO.D.R.は上るし、一種類の土壌を使えばかなり相関は高いのですが、さまざまな土壌を使いますとそう簡単にはいえない部分があります。そのようなパラエティーのある土壌の作物生育の判断基準として何がいいのかということやはりO.D.R.ではないかと思うわけです。

ダイズの生育を根粒と直接結びつけたわけですが、大胆に言ったというのが率直なところですよ。というのは、根粒の生育そのものは、地上部全体というか、光合成量と相関が高いわけです。だから根粒を支配する要因は最終的には光なのですが、そこらへんの話しを大胆にカットしてしまったのです。しかし、あえて言ったのは、根粒は酸素濃度が3%下がっても大きく障害をうける。さらに水膜の話しをしますと、さらに影響があるはずだという安田さんの御指摘は私のデータには都合がいい。黒ボク土の話しなんですけど、あれは地下水位40cmでも生育が悪い。これには毛管上昇だけでなく土壤亀裂ができていくというマクロな構造も関与していると思われま

**須藤** 中野さん、新垣さん、上田さん、唐橋さん達は、易耕性という言葉に自分の職域の中でどういう意味をもたせていますか。

**中野** 機械の使いやすさ、作業のしやすさ、それから碎土率と割合広い意味で使っています。

**新垣（三重大）** 耕耘の外力によって結合程度の異なるところで細かい土塊に分かれていくが、耕耘という外力の問題を統一的に取り扱い、科学性を持った土塊分布のおさえ方を考えることは易耕性と非常に関係があると思います。

**箱石（中国農試）** 新垣さんにおうかがいします。マサ土（花こう岩風化土）の様に粗大粒子を混じた系（未熟な場合には構造単位は微細粒子で被覆された砂粒子であり、熟畑では団粒と砂粒子が構造単位である。）の力学的挙動は従来いわれてきた均質なものをあつかった模型の延長で考えられるのでしょうか。

**新垣** 御質問の内容には大変難しい問題が含まれてお

ります。空間組成を考慮した構造モデルと現象論で扱う構成方程式との間のギャップはあまりにも大きいとギブアップ宣言をする人もいます。それは粒状態の研究分野でも基礎方程式は連続の式を使うところにあるわけです。御質問の中で未熟土で石英のまわりに粘土がくっついているのと、熟畑化して団粒化してくるその連がりやがどうやら先程いいました構造と力学の問題の扱い方の大きな壁と同じような気がします。それで連続に近いものを不均一な粒の集りに考え方を拡張していくことは今大きく問われていることだと私は肌で感じています。

**安富 (茨城大)** 弾丸暗渠の穿孔断面形状が縦長、横長という話でしたが、これは縦横の土壤構造の発達程度の異なりによると考えられないですか。例えば通気性の差であるとか。

**新垣** 異方性の問題は大きいと思います。普通横長になる要因は重力場に基づく土圧です。ここで示した土は湿潤重量は $0.7\text{ g/cc}$ と水より軽い。これは空間間隙が非常に大いからです。弾丸暗渠を $50\text{ cm}$ にやっただとしても $0.05\text{ kg/cm}^2$ で、とても穴をへこます力にならない。それが機械走行の転圧がありますので。しかし縦長になる理由はわかりません。以前、泥炭では縦長になるという文

献は読んだことがあります。

**座長** 最後に全体を通しての御意見をいただきたいのですが。

**寺沢 (太陽コンサル)** 研究を離れているので大変興味深く聞かせていただきました。私のこれまでの経験から2つほど考えてもらいたいと思うことを述べます。1つは構造形成の単位である土粒子の結合によってつくられるドメインです。これがどういう形態で存在するかという問題がはっきりしていません。もう1つは、機械耕耘に関連してですが、機械耕耘は確かに膨軟になりますが時間がたつとまたもとに戻ってしまうという問題があります。そのための改良剤の使用方法を検討する必要があります。と思います。

**座長** 今、寺沢さんからまとめをいただきましたが構造をめぐって、1つは単位の問題。単位の大きさ、構成の仕方、あるいは評価方法といった問題がある。もう1つは改良問題。ヒドロキシアルミニウムの話しをうかがったわけですが、構造は今その辺に集約されるのではないかと思います。

時間もきたようなのでこの辺で終らせていただきます。どうもありがとうございました。

# 粘質水田土の粗孔隙の実態と透水性について

## — X線透写像による土壌と間隙に関する研究(Ⅱ) —

徳永光一\*, 佐藤照男\*\*  
菊池 宏\*, 今 和則\*

On the real state of coarse pores in clayey paddy field's soil and their permeability.

— Study on the soil and its void by X-ray radiograph (Ⅱ) —

Koh-ichi TOKUNAGA\*, Teruo SATO\*\*

Hiroshi KIKUCHI\*, Kazunori KON\*

\*Faculty of Agriculture, Iwate University

\*\*Akita Prefectural College of Agriculture

### I はしがき

本報告は、第Ⅰ報<sup>1)</sup>と同じ“重液浸入法”を水田土層に適用した結果について報告する。用いた水田土は粘質土であり、重液造影剤の孔隙への浸透が第Ⅰ報と同じ方法では極めて困難であり、本報告では新たに開発した浸透法（造影剤自体は第Ⅰ報と変らない）について述べる。

また孔隙像の軟X線撮影を終えた試料土はそのまま不攪乱で透水係数を測定したが、生土不攪乱の裸体試料を透水試験にかけるためには新たな透水試験法を考案する必要を生じた。その試験法についても紹介する。

以上の結果えられた孔隙像の実態や特徴と対比しつつ測定された透水係数の異方性や水稻根による根成孔隙の意義について考察する。

なお、本研究では孔隙とは管状またはそれに近い間隙を指し、間隙とは孔隙の他に粒子間隙、亀裂など土壌中の固相以外の空間を総称するものとして用いる。

### II 研究の方法

#### 1. 採 土

採土した水田は盛岡市郊外の矢巾<sup>ヤハバ</sup>不動地区（以下矢巾地区と略称）沖積水田（古田）と八郎湯水田（秋田県立

農業短大農場、水田歴10年）の2ヶ所である。いずれも粘質の排水不良田である。図-1に土壌型と土層断面およびサンプリング深度を示す。

採土は主として壺掘りにより1辺15cmぐらいの不攪乱立方体として切り出し、上面を石灰粉によりマークして持ち帰り、実験室で上下面を判別しながら、ワイヤソーにより42mm立方体に小切断した。圃場では亀裂が存在したが、採取した立方体ブロックには亀裂を含まないように注意してサンプリングした。したがって小切断の際にはほとんど亀裂は見られなかったが、発見されれば亀裂を避けて整形した。

#### 2. サンプルの諸性質

表-1に各サンプルの物理性一覧を示した。矢巾試料では下層ほど砂分が減りシルトが増えているが土性はいずれも粘質ロームである。その他の諸量も沖積水田としては、ごく標準的な値を示している。

八郎湯試料は未分解有機物に富むので粒度分析に際しH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>処理を行い、また分散も不良なのでU. S. 処理を施した後珪酸ソーダ添加を行った。粒度組成は矢巾にくらべて粘土含量が30%以上多く、土性は各深度とも重粘土である。圃場水分は130%以上で矢巾の3倍以上、逆に乾燥密度 $\rho_d$ は平均0.6 gr/cm<sup>3</sup>以下で矢巾の $\frac{1}{2}$ 以下と対照的である。この相違は八郎湯試料が有機物に富むだけで

\* 岩手大学農学部

\*\*秋田県立農業短期大学

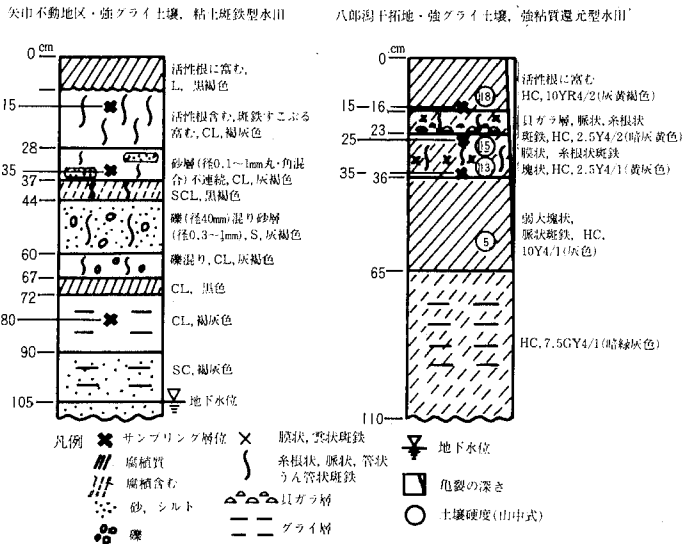


図-1 採土地点の土壌断面

表-1 試料土の物理性

深 度 (cm)	矢 巾			八 郎 潟			
	15	35	80	15	25	35	
土 性*	CL	CL	CL	HC	HC	HC	
粒 度*	砂	63	58	46	19	11	16
	シルト	21	23	36	29	34	34
	粘 土	16	19	18	52	55	50
液性限界 $W_L$ (%)	41.73	41.65	47.66	131.78	201.88	186.08	
塑性限界 $W_P$ (%)	23.15	22.31	24.36	57.54	84.53	72.73	
塑性指数 $I_P$	18.58	19.34	23.30	74.24	117.35	113.35	
圃場含水比 $W_f$ (%)	30.82	31.50	53.76	124.94	139.45	145.39	
乾燥密度 $\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.488	1.568	1.258	0.615	0.573	0.581	
真比重 $G_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.670	2.678	2.637	2.629	2.541	2.563	
間隙率 $n$ (%)	44.27	47.45	52.29	76.61	77.45	77.33	

\* 国際土壌学会区分による

なく粘土鉱物が膨張性2:1型スメクタイトであることによるものと思われる。八郎潟の  $\rho_d$  が低いことは、X線吸収が少なく相対的に撮影しやすい利点を生じた。

3. 造影剤の浸入法

第I報では試料土の上面から造影剤を降下浸透させるか、造影剤に下面を浸して毛管上昇させるかなどの方法を行った。これらは重力と毛管力によるものであるから、“重力・毛管力法”と呼ぶことにする。

しかし本研究の対象土はすべて粘質土であり重力・毛管方法では造影剤の浸入がきわめて困難であった。一方、水田土であるから上下方向には直径の大きい根穴が存在するが、このような大孔隙は造影剤が浸入しやすけれども、下端から脱落してしまい孔隙を充填できず、

孔隙造影が不良となった。そこで酸化鉄粉末 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  など) を造影剤として用いる方法など2~3の試みを行ったが成功せず、最終的に次の方法で良好な結果をえた。

まず試料土を水で飽和し、底面にベントナイトペーストを全面に塗る。上面は4周を巾3mm程度残し、その内部を浅く削ってここに造影剤 (ジヨード・メタン) を湛液する。上面と同じ正方形 (42mm角) のプラスチック板で蓋をする。蓋の中央に針穴をあけて試料土を放置乾燥させる。側面4周から水分が蒸発すると共に上面に湛えた造影剤が孔隙に浸入してゆく。周面に到達した造影剤は外壁に灰白色の光沢にじみとなって漏出するのでベントナイト・ペーストをコテ塗りして抑える。軟X線透視

表-2 軟X線撮影条件 (試料別)

試料土	矢巾(粘質ローム)			八郎 潟(重粘土)		
	15cm	35cm	80cm	15cm	25cm	35cm
露出時間 (sec)	96	96	84	40	40	40

撮影機種, CMB-3

表-3 軟X線撮影条件 (試料共通)

管電圧 (KVp)	管電流 (mA)	試料土厚 (mm)	焦点・フィルム 距離間 (F.F.D.) (cm)	フィルム 種類	増感紙
60	3	42	50	フジHS	鉛 箔 0.03mm バックのみ

撮影機種, CMB-3

装置により浸入状況を確認しながら、適当と思われる時点まで乾燥による浸剤を続ける。今回の試料ではこの浸剤に24~48時間を要した。ただし夜間はラップ・フィルムなどで梱包し、乾燥を中止した。

この結果、粗大孔隙も微細孔隙も共に造影剤の浸入が良好となった。この浸剤法を“乾燥法”と呼ぶことにする。重力・毛管法に比べて乾燥法は時間を要するが、前者では大孔隙の造影剤脱落を生ずるなどの欠点があるが、後者ではそれがない。また重力・毛管法では浸剤の困難な不透水性試料に対して乾燥法は必須の浸剤法となる。

4. 軟X線撮影法

使用した軟X線装置は第I報と同様であるが、土壌が異質であり試料土厚さも倍増したため撮影条件は第I報に比べてフィルムの種類を始めかなり異った。表-2, 3に実行された撮影条件を一括して示した。

軟X線照射は図-2に示すとおり、各試料ともX,Y

を出張先で行うため時間的制約から今回はZ面撮影を省略した。

また造影剤を浸入させないで撮影(無剤撮影と呼ぶ)した結果は、八郎潟試料では斑鉄が明瞭に写し出された。管状と糸根状(根穴に酸化鉄沈積が充満しているものを指す)あるいは暈管状の斑鉄の区別も明らかであった。矢巾試料では $\rho_d$ が1.5 (gr/cm<sup>3</sup>)級と大きいためか斑鉄の影像是薄く明瞭さを欠いていた。今後、無剤撮影は斑鉄その他金属の沈積などを形態的に究明する手法として研究の余地が十分にある。画像処理装置を軟X線透視装置と連動させることにより薄いコントラストを鮮明化することは既に常用の手法になっている。したがって軟X線透写法は有力な武器になると考えられる。

5. 透水試験法

試料土の孔隙造影フィルムを撮り終った後、造影剤を気散させ、透水試験と粗孔隙量の測定を行った。これらの試験を行った理由は試料土の孔隙影像に明らかな異方分布を認めたからである。

軟X線撮影後も試料土は生土の不攪乱状態を維持しているため、同一試料についてさらに別個の測定を重ねることができる。この点が顕微鏡撮影などに比べて“重液浸入法”の有利な点である。

撮影後試料土に含まれる造影剤は気散により除去する必要がある。気散は試料土底面のベントナイトを除去して、水柱-10cm程度の負圧砂面上に試料土をのせ、3~4日ほど放置することで目的を達した。試料土も湿润状態が維持される。

透水試験を行うに当っては、試料土が42mm立方体の不攪乱“裸体”であるから種々工夫を要した。図-3に示すとおり、試料側面4周に繰り返した粘土板を密着張りつけする。粘土板は厚さ1~2mmで、無機質青粘土、粘

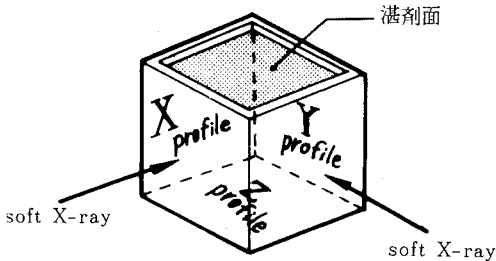


図-2 試料土に対する軟X線の照射方向

の2面について行い、それぞれの撮影を行った。Z面撮影も可能だが、造影剤の除去などの手間を要する。撮影

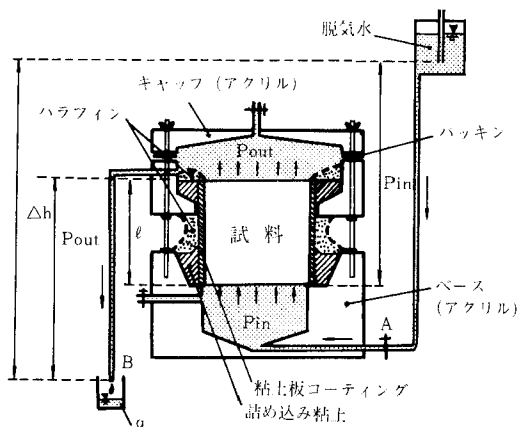


図-3 透水試験器

土含量40%程度の軽粘土，練り返した状態での透水係数は $1.81 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ であった。粘土板コーティングを終えた試料は上，下端面の全面を薄くハツリ，不攪乱構造面を露出させてから，透水試験器にセットする。ベースとキャップの試料嵌めこみ部はコーティング粘土と同じものをよく詰め込んで密着させる。さらに図-3に示すようにパラフィン上塗りを行う。

4 周の粘土板は通常の透水試験器における不透水性円筒に相当し，パラフィン粘土板からの蒸発防止および粘土板周面に対する機械的強度増の役割を果す。当初の予備試験の段階では粘土張りを行わず，パラフィン・コーティングのみで透水試験を行ったが，パラフィンと試料土の密着が悪く，試料外周とパラフィンの間の通水を断ちえなかった。粘土板は密着が良好でこの欠陥は除去された。

しかし試料土の透水係数が $10^{-6} \text{ cm/s}$ 以下になると試料下面にかける水圧 (Pin) を大にしなければならないが，Pin が+10数cmを越えるとパラフィン下部が水圧のため膨張変形し漏水を生ずる。そこで試料上面にかける水圧 (Pout) を20~30cmの負圧とし，Pin は+10cm程度にとどめた。これにより動水勾配を10ぐらいまで高めることができ，透水係数 (K) の小さい土も安定して測定できた。

なお試料の飽和は透水試験直前，ベースとキャップ内の大気を-100cm水柱程度に減圧し，これを維持して平衡に達したら，ベース側を満水し，Pin をかけたまま，キャップ内に満水を生ずるまで放置して行う。飽和が終れば直ちにキャップ内を満水して Pout を負圧にして透水量観測に移る。試験に用いる水はすべて脱気水とし

た。また試験は気温21.5℃の恒温室内で行われた。

Pout に30cm弱の負圧を作用させる場合，試料の収縮脱水を生じないか，それによる孔隙や通水径路の変形を懸念して，次のようなテストを行った。すなわち透水量観測直前にベース側のコック A を閉じて排水口 B からの脱水量を観測したが，Pout=-31cmにおける脱水量は始めの1時間で $0.14 \text{ cm}^3$ ，次の3時間で $0.04 \text{ cm}^3$ ，後続の92時間では $0.0 \text{ cm}^3$ ，合計して試料体積の0.34%と微少であった。したがって負圧負荷方式による透水試験中の収縮脱水現象は発生しないものと考えた。

K の測定法は以上のとおりに行ったが，本研究における K 測定の目的は孔隙影像に対応した異方性のチェックにある。そこで同一試料について鉛直方向の透水係数  $K_V$  の測定が終了すれば，粘土板コーティングの一部を剥離し，上，下面に粘土張りを施し，水平方向の透水係数  $K_H$  を測定した。水平方向は互に直角な X, Y の2面がある。両面のうち写真1~8に示した影像面に平行な水平方向について  $K_H$  を測定した。孔隙分布の実態と  $K_H$  の対応を検討しやすくするためである。このように K の測定は X 線撮影後の同一試料につき  $K_V$  と  $K_H$  を観測した。

## 6. 粗孔隙量と根体積の測定

透水試験を終えた試料は砂柱法とガラス・フィルター吸引法により-15, -30, -60cm (水柱) までの pF-水分曲線を測定した。これを行った試料は-15cm深度のもので，他の試料は飽和状態から-30cmでの脱水量のみを測定した。これらにより粗孔隙量を判定した。この測定を行ったのは孔隙影像やその中に含まれる根系遺体との対比を行うためである。

ここでは本研究の標題および本文中で用いる粗孔隙などの名称とその直径については表-4のように定めて，これによった。毛管，非毛管の境界は通常に用いられる範囲から pF 1.5 (相当径0.1mm) をとってあるが，“粗孔隙”の名称については今回の孔隙影造の大部分が含まれる直径を考え，50  $\mu\text{m}$  以上に用いた。“大孔隙”の名称も同様に影像の実態から鉛直孔隙の太いものを該当させるように500  $\mu\text{m}$  以上に対して用いることとした。

前述の脱水量測定により粗孔隙量の観測が終了すると，試料を水中で静かにほぐし\*，水ふるい (74  $\mu\text{m}$  以上の各種) によって根遺体をできる限り拾い出し，ピクノメータ法により根体積を測定した。根遺体はいずれも断片状であり，茶褐色化していたが，八郎湯試料には微細な遺体が多量に認められた。

\*) 透写像写真に現われた砂塊や要チェックの影像の実体は，この解体作業時に写真中の位置と対比しつつ調べておく。



表-4 本文で用いる孔隙名と直径など

	大孔隙		粗孔隙		微細孔隙
	非毛管孔隙		毛管孔隙		
直径 (mm)	1	0.5	0.1	0.05	0.01
負圧(H <sub>2</sub> O)			30	60	300
pF			1.5	1.8	2.5

### III 結果と考察

#### 1. 孔隙影像について

撮影結果を写真1~8に示す。X線原板フィルム影像は42mm角正方形に、その引伸・焼付プリントも拡大正方形に写るが、掲載写真は紙面の都合で上、下をカットしてある。左右巾は原板像全巾にほぼ等しい。すべての写真上辺のさらに上方に湛剖面があり、その位置が試料土の上面である。ただし写真7は写真上辺に湛剖面を入れてある。この試料は後述の目的から試料の側面（採取土層における鉛直面を90°倒して水平面とし、湛剤を行った撮影である。またX,Y両面の写真を掲載したのは深度15cmのみで他はいずれか1面のみに割愛した。

全写真を通覧すると、上下左右に走る多数の黒筋、黒帯が見られる。これは間隙に浸入した造影剤の影であり、間隙の形が現われている。写真1,2あるいは写真5,6のX面とY面の影像を比べるといずれも黒筋の集合である。両面は同一孔隙群を互に直角な2方向から投影した影像であるから、そのいずれもが筋状に現われたことは、間隙の形態がほぼ等直径の管状孔隙であることを示している。さらに影像の疎な部分を観察すると、鉛直方向の筋のところどころより一段細い筋がほぼ直角に分岐しているのが見られる。また鉛直方向の筋は太く、水平方向の筋は細い。これらの影像の特徴と試料土採取位置が水田の-15cmという事実から考えて、黒筋群は水稻根の根穴孔隙であると判断できる。

鉛直方向の太い孔隙は冠根（1次根）により、水平方向の細い孔隙は2次根以下の側根により形成された“根成孔隙”ということになるが、土壤中における根穴の保全と発達にはまことに良好、精細であることが見てとれる。とくに八郎潟試料では想像を越える細根（毛管孔隙）の発達ぶりと云えよう。

深度15cm以下の写真については透写像の1面を割愛したが、両面をくらべて黒筋群は15cmと同様に、すべて管状孔隙群であると確認された。また孔隙像の形態的特徴もすべて15cmに類似しており、水稻根による根成孔隙と判断される。ただし写真3,4の鉛直方向に見られるミリ級直径の孔隙は水稻根でないかも知れない。深度80cm

の写真4では孔隙も疎となっており、水稻根群域の下端であることを窺わせるが、それでも細根による毛管孔隙の蓄積は試料の全面に及んでいる。

また全写真を通じて孔隙が根成であるため鉛直、水平方向とも1孔隙の太さはほぼ一様で、カーブはゆるやかなものが多い。大孔隙はほぼ直線的に走り、細根孔隙は下層土ほど屈曲が多くなる。

根成孔隙のほか写真に現われた影像として黒雲状の影が見られる。写真3,4,7,8などにそれがある。この黒雲は砂塊の部分である。無刺撮影フィルムでは粒状影として砂塊は判別できるが、それと同位置に上記の黒雲が現われている。撮影後の試料土解体の際にも同位置に砂塊の存在を確認した。浸剤過程で乾燥脱水が進むと砂の粗孔隙には浸剤が早く始まるので、毛管孔隙とほぼ同時に造影されてくるのが透視により観察された。

砂塊のほか写真3の矢の影は試料解体により黒色の炭化物破片であることが分った。水に浮き木炭のような筋状節理が発達しており指先で容易に潰れた。古い植物枝茎の炭化物と思われた。新しい水稻根遺体がこの破片を貫通している部分も見られ、造影剤が孔隙を通じてこの炭化物に浸みこみ造影されたものである。写真3には矢の他に3個の同種像が左上に見られる。

写真2の矢の煙状像は試料外周に漏出した造影剤の拭き取り不十分による造影ミスである。

次に矢巾と八郎潟を比較する。矢巾は鉛直方向の大孔隙の本数が多いが、径はより細い。水平方向の毛管孔隙は八郎潟の方が遙に数が多い。これは矢巾試料は砂含量が高いため、乾燥浸剤を強く行くと黒雲影が大きく拡がりやすいため、十分に毛管孔隙の造影を行えなかったことが原因の一つである。しかし基本的には毛管孔隙量が八郎潟の方が多きことによる。深度15cm試料のpF 1.5~1.8の毛管孔隙量は八郎潟が2.06%（容積率）、矢巾が1.08で2倍の差がある。したがって八郎潟の水平方向毛管孔隙の発達が発達した矢巾のそれより著しいことは明らかであり、写真にはこの傾向が強調されて現われていると見られる。

しかし鉛直方向大孔隙像は試料土中の実在量を忠実に反映していると考えられる。浸剤過程における透視観察では造影剤の浸入は大孔隙から始った（写真7は除く）。その後次第に毛管孔隙へと進むことが明らかであったので、掲載写真撮影の段階では実在大孔隙はすべて浸剤を終了していると判断されるのである。

したがって矢巾の鉛直大孔隙群は八郎潟に比べて細く、数が多いことは写真に示されたとおりに受けとれる。冠根の形成した鉛直孔隙が細く、2次根以下による水平方向毛管孔隙の数が少ないという矢巾水田は八郎潟水田に比べて、水稻根の生育が不良であり、作柄もこれに

表一五 孔隙影像の垂直方向と水平方向の直径と本数  
(試料断面積: 17.64cm<sup>2</sup>, V: 垂直方向, H: 水平方向)

孔隙直径 ( $\mu\text{m}$ )	矢 巾						八 郎 湯					
	15cm		35cm		80cm		15cm		25cm		35cm	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
0~49		4		1				28		5		8
50~99		18		12		31		56		31		65
100~149		3	7	12	3	7	2	18		21		21
150~199	6	1	6	1		2		7		2		1
200~249	4		3	1				2	1	3		2
250~299	5	1	3		1		1	1	5	1	4	
300~349	6								1	1	1	
350~399	7		3				5		2		1	
400~449	1						2		2		3	
450~499	1		2						1		2	
500~549	2										2	
550~599	1								4		2	
600~649							1		1		2	
650~699			1						1			
700~749												
750~799							1					
本 数 計	33	27	25	27	4	40	12	112	18	64	17	97
平均直径	300	60	280	90	160	90	370	60	420	90	440	90

応じたものであることが推定される<sup>2)</sup>。

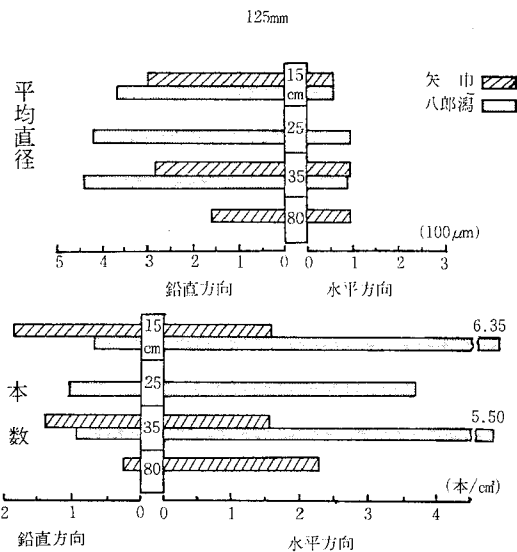
表一五には写真1~8の原板フィルム像を40倍に映射し、孔隙直径や本数を計測した結果を示す。鉛直方向孔隙は試料上面から下面まで貫通するもののみを計測した。水平方向孔隙は径が小さく多数のうえ、径路も入り組んでいるので、試料横巾の中央を通る鉛直ベルト(スクリーン上で24cm巾)を横断する孔隙を紙上にトレースして計測した。表一五に示す平均直径は各直径本数の加重平均である。図一四に孔隙本数を試料断面1cm<sup>2</sup>当りに換算したものと平均直径を図示した。35cmまでの孔隙について見れば、

鉛直方向 直径300~450 $\mu\text{m}$ , 1~1.5本/cm<sup>2</sup>

水平方向 直径 60~90 $\mu\text{m}$ , 2~5本/cm<sup>2</sup>

と概括される。水平方向の本数を矢巾について図一四の値からのみ平均化すれば1.5となるが、前記した毛管孔隙量を考慮に入れて2と見積っている。

写真7の孔隙像は前述したように試料の水平方向に浸剤を行ってえられたものである。その目的は毛管孔隙が湛剤面から遠隔の写真下端に横たわる大孔隙まで接続しているか、その連続性を造影剤の浸入によって確かめようとしたものである。写真7は下部がカットされているが、原板では下端の大孔隙まで完全な造影が行われている。試料寸法が42mmに過ぎないから、側方毛管を形成した2次根以下の細根は試料下端から湛剤面まで伸長範囲



図一四 孔隙影像の平均直径と本数

に入り、写真の結果は当然とも思われる。しかしこれにより他の写真とは逆コースの浸透径路もまた良好な連続性を有することが分る。

以上、影像からえられた粗孔隙分布の特徴をまとめると次のようになる。

- ① 水稲根による根成孔隙の分布が支配的であり、深度35cm以上では濃密、精細な分布をしている。
- ② 鉛直方向に大孔隙、水平方向に毛管孔隙が走るといふ孔径の大小分布に明らかな異方性があり、透水性への影響が推察される。
- ③ 造影剤の浸入状況から見て、鉛直、水平両孔隙群の接続性は良好である。
- ④ 孔隙の影像外形は径の広狭、屈曲が少い円孔の管路網と見られる。
- ⑤ 粗孔隙としては根成孔隙の他に局所的な砂塊の間隙が見られる程度であった。

以上のような特徴は水稲根系の特性に原因するものであるから、水田の土層条件や水稲根の生育、生態によりさらに変動を生ずるであろう。例えば採土深を15cmより浅くとれば冠根が45°方向や水平方向に伸長するから、孔隙網の特徴は大巾に変化するはずである。

### 2. 試料土中の根体量

試料から洗い出した根体の太さは径0.1mm以上のものが目立った。また毛管、非毛管孔隙の境界を一応0.1mmとしたことなどにより pF1.5 間隙率を測定し、これに対する根体積率を算出した。表一6 に結果を示す。

矢巾では8%以下、八郎潟ではかなり多く20%以下の根遺体がある。前者では非毛管孔隙の大部分が空洞であり、ごく一部に根体が残っていると考えられる。後者では非毛管孔隙の約半を根体が占めていることになる。しかし八郎潟試料では根体も微細なものが多かったため、50 $\mu$ m以上の全粗孔隙量(4%強)に対する根体積率に算出しなおせば、約半の10~8%程度となる。

以上のことから写真1~8の孔隙像はおよそ空洞となっている物理的間隙と見なすことができる。

### 3. 透水係数の異方性

表一7 に測定した透水係数一覧を示す。これらの値は前述のように写真1~8の試料そのものについて測定した結果であり、写真に示された孔隙分布の異方性がよく反映されている。各試料の  $K_V/K_H$  は矢巾80cmを除き数十倍~数百倍の比率を示した。

$K_V$  値の中で八郎潟35cmがやや大きい値を示している

表一6 試料土中の根体片の体質

採土地点	層深	間隙率 (%)	pF1.5 間隙率 A (%)	
			A (%)	A に対する根体積率 (%)
矢巾	15(cm)	44.27	2.49	7.81
	35(cm)	41.45	2.39	3.43
	80(cm)	52.29	1.38	2.35
八郎潟	15(cm)	76.61	2.11	19.46
	35(cm)	77.33	2.45	16.54

が、これは鉛直大孔隙が他よりも太いためと見られる。また  $K_H$  値の中では矢巾も八郎潟も35cmが他に比べて大きい。この理由はいずれの試料も写真下辺部に横たわる砂塊の影響と見られる。掲載していない Y,X 面と対比すると、これら下端部砂塊はほぼ一直線状に連らなっていることが分る。したがって水径として有効な層をなし  $K_H$  を増大させていると判断した。

また矢巾80cmは  $K_V/K_H$  が1.1で等方的である。これは写真4に見るとおり、鉛直方向大孔隙が2本と少ないうえ、いずれも下方で途絶し下端まで貫通していないため、 $K_V$  が  $2 \times 10^{-7}$  cm/s まで低下したものと見られる。写真には横方向の砂層が上辺に沿って分布するが、これは直角方向から見て、まとまりのない連続性に欠けた分布をしているので  $K_H$  を高める効果が少ないと考えられた。

以上のように粗孔隙分布の実態は表一7のK値をかなりの程度に説明しうるが、以下に孔隙像の実態に Poiseuille 式を適用して透水係数の計算値  $K_C$  を算出してみる。 $K_C$  と実測の  $K_V$  や  $K_H$  を比べる。孔隙像の直径や本数のデータを示した表一5に基づき、動水勾配を1.0として Poiseuille 式から計算した  $K_C$  を表一8に示す。 $K_C$  の算出は孔隙計測精度の高い鉛直方向大孔隙の  $K_V$  を主たる対象とした。 $K_H$  については矢巾80cmが水平方向毛管孔隙の計測精度が良かったので、これについて  $K_C$  を算出した。

表一8の計算値と実測値を比較すると、矢巾80cmを除き両者の比は2~7倍で計算値の方が大きい。K値としてはオーダー以内の精度で一致しているが、いずれも計

表一7 試料土の飽和透水係数の測定結果

地点	矢巾			八郎潟		
	$K_V$ (cm/sec)	$K_H$ (cm/sec)	$K_V/K_H$	$K_V$ (cm/sec)	$K_H$ (cm/sec)	$K_V/K_H$
15(cm)	$1.49 \times 10^{-4}$	$3.04 \times 10^{-7}$	490.1	$1.81 \times 10^{-4}$	$5.41 \times 10^{-7}$	334.6
35(cm)	$2.76 \times 10^{-4}$	$5.71 \times 10^{-6}$	48.3	$7.30 \times 10^{-4}$	$8.66 \times 10^{-7}$	843.0
80(cm)	$2.01 \times 10^{-7}$	$1.87 \times 10^{-7}$	1.1	—	—	—

注)  $K_H$  の透水方向は写真面平行方向である。15cmについては、写真2、6面に平行方向で測定した。

表-8 透水係数の計算値( $K_c$ )と実測値( $K_m$ )の比較

試料	計算透水係数 $K_c$ (cm/sec)	実測透水係数 $K_m$ (cm/sec)	$K_c/K_m$	
矢	15cm $K_v$	$8.26 \times 10^{-4}$	$1.49 \times 10^{-4}$	5.54
	35cm $K_v$	$5.57 \times 10^{-4}$	$2.76 \times 10^{-4}$	2.02
巾	80cm $K_H$	$6.34 \times 10^{-6}$	$1.87 \times 10^{-7}$	33.90
八郎湯	15cm $K_v$	$9.50 \times 10^{-4}$	$1.81 \times 10^{-4}$	5.28
	35cm $K_v$	$5.11 \times 10^{-3}$	$7.30 \times 10^{-4}$	7.00

算値が大きく出た原因として次のようなことが考えられる。① Poiseuille 式的前提である管路の直線性や断面の真円性について実態は相違がある。②表-6に示したとおり根系遺体が孔隙中に残存し、その局部については有効通水断面の直径が孔隙影像に現われる外径より小さい。③孔隙内壁に沈積した酸化鉄などの斑鉄も②と同様な影響を与える。(根系遺体や斑鉄は造影剤の浸潤により、孔隙中心部と同様に黒化して撮影される。活性根は造影剤に浸しても根体内に浸潤を生じない。)

矢巾80cmの $K_H$ については $K_c$ が実測値 $K_m$ の34倍と一段に大きい。その理由は上記した①、②によるものと思われるが、とくに写真4を観察すれば毛管孔隙の屈曲や分岐が多く、管路内損失と管路長(有効流路長)の増大により $K_c/K_m$ が特に大きくなったものと思われる。

以上のことから定量的に見ても、 $K_v$ と孔隙影像の実態とは Poiseuille 式により、かなり良好な(10倍以内)アプローチの得られることが分った。しかし $K_H$ については毛管孔隙の実態に合せた理論式の検討が必要になると云えよう。水田土の $K$ の異方性については、すでに横井ら<sup>3)</sup>、増島<sup>4)</sup>などにより知られているところであるが、ここでは新しい手法により再検討を試みた。

#### 4. 透水性増大に及ぼす根成孔隙の意義

写真に示した根成孔隙像のうち、鉛直大孔隙はその $K_v$ を $K_H$ と比べることにより透水性増大に果す役割の大きいことは明らかである。

しかし2次根以下の水稻根により形成された水平方向の毛管孔隙は精細、濃密な分布を示すにもかかわらず、

$10^{-7}$ cm/s級の $K_H$ であり、土壤の透水係数としては通常“不透水性”に分類されるオーダであった。これらの毛管孔隙群の存在は粘質水田土の透水性に対し、どの程度の貢献をしているのであろうか。

この点を明らかにする目安として、 $K_H$ を測定した各試料を攪乱し、練り返した状態で $K$ を測定した。練り返しにより毛管孔隙を消滅させ、その状態での透水係数 $K_R$ を測り、 $K_H$ と比べれば、毛管孔隙の透水性への寄与が推定できると考えた。 $K_R$ 測定に用いた試料は $K_H$ 測定試料と同深度であるが同時採取の別個体である。 $\rho_d$ や $Wf$ は $K_H$ 試料としてできるだけ同一にした。 $K_R$ 測定は練り返し後アクリル円筒に充填し通常の変水位法で行った。結果を表-9に示す。

$K_H$ に対し $K_R$ は明らかに低下している。 $K_R$ が自然堆積状態で根成孔隙が皆無の場合の $K$ と全く同一であるかどうか、今回の実験の範囲では十分な判断は困難である。練り返しによる粘土の配向や吸着水層などの変化が $K_R$ の低下の一因をなしているかも知れないが、ここではそれらの影響を無視しておく。また、35cm深の $K_H$ は砂塊の透水性が影響していることはすでに見た。したがってこの層位の $K_R$ 低下には砂塊水径の消滅による効果も含まれている。そこで毛管孔隙の透水性については砂塊の影響がない15cm、80cm深の $K_R$ と $K_H$ の対比によって判断する。両層における $K_H/K_R$ は3.1~15.4倍の値を示している。この値は前述した粘土粒子に対する練り返しの影響を無視すれば、毛管孔隙が透水性増大に対し少なからざる貢献をしていることを物語るといえよう。

## IV ま と め

(1) 粘質ローム(矢巾地区)と重粘土(八郎湯)の強グライ土壤水田から15, 25, 35, 80cm深の土壤を不攪乱採取した。この試料につき“重液浸没法”により粗孔隙(径50 $\mu$ m以上)の軟X線透写像を撮影した。

(2) 造影剤の浸没法を改善し、新たに“乾燥法”を考案した。これにより孔隙造影法は著しく改良された。

(3) 円筒に入っていない裸体不攪乱土に対する透水試験法を考案した。これにより重液浸没法による撮影が終

表-9 練り返し土の透水係数( $K_R$ )と不攪乱土の透水土数( $K_H$ )の測定結果

地点	矢 巾			八 郎 湯		
	$K_H$ (cm/sec)	$K_R$ (cm/sec)	$K_H/K_R$	$K_H$ (cm/sec)	$K_R$ (cm/sec)	$K_H/K_R$
15(cm)	$3.04 \times 10^{-7}$	$5.46 \times 10^{-8}$	5.57	$5.41 \times 10^{-7}$	$3.52 \times 10^{-8}$	15.4
80(cm)	$1.87 \times 10^{-7}$	$6.00 \times 10^{-8}$	3.12	—	—	—

註)  $K_H$ は表-7より引用

った試料土の透水係数を測った。同一試料につき鉛直方向と水平方向の透水係数 ( $K_V$  と  $K_H$ ) を測定した。

(4) 孔隙影像是写真に示すとおり、水稻根による根成孔隙の発達が著しかった。鉛直孔隙は最大径0.7~0.8mm, 平均0.4mmぐらい, 分布密度は1~1.5本/cm<sup>2</sup>, 水平孔隙は径がほぼ均一で60~90 $\mu$ mぐらい, 分布密度は2~5本/cm<sup>2</sup>であった。鉛直方向の孔隙は太く, 水平方向のそれは細いという根成孔隙の特性による異性が明瞭であった。

(5) 試料土中の根系遺体は矢巾地区が非毛管孔隙(径100 $\mu$ m以上)量の2.4~7.8%, 八郎湯が同じく16.5~19.5%含有されていた。孔隙影像の大部分は空洞と考えられた。

(6) 実測透水係数(飽和)は孔隙像の分布状況によく対応し, 35cm以浅は  $K_V/K_H$  比が数十ないし数百倍の値を示した。Poiseuille式を孔隙像の実態に適用して透水係数を求めた場合, 鉛直方向については10倍以内の精度で実測  $K_V$  値に一致した。水平方向については同式は不適であった。

(7) 実測  $K_H$  は  $10^{-7}$ cm/s 級の値であったが, 試料土を繰り返して測定した透水係数  $K_R$  はさらに小さく  $K_H/K_R$  比は3.1~15.4倍であった。このことは根成毛管孔隙(径50~100 $\mu$ m)も粘質水田土の透水性増大に貢献していると思われた。実測  $K_V$  は35cm以浅の試料では  $10^{-4}$ cm/s 級の値を示し, これは冠根による根成非毛管孔隙の貢献により大巾な透水性増大がもたらされていることを物語っている。

【謝 辞】本研究の遂行に当り, 軟X線を「ミミズ体内の団粒形成過程の研究」(1980年)に使用された岩手大学土地改良学講座石川武男教授や同大農地造成研究会には種々御支援を頂いた。また掲載写真の引伸・焼付については上記講座の向井田善朗技官の手を煩わした。

透水試験器の設計, 製作については別テーマの研究を遂行中の宮城県立農業短大, 佐々木長市教官と共同で作業を行った。また, 本研究遂行過程では岩手大学農学部修士課程在学中の成岡市君の協力もえた。

軟X線撮影については第I報に引きつづき, ソフテックス社映像研究所の御好意を頂いた。

試料採取に当っては岩手県盛岡南部土地改良事業所の永井毅所長以下, 関係スタッフにお世話になった。

これらの方々に誌上を借り, 深甚な謝意を表する次第である。

#### 引用文献

- 1) 徳永光一, 成岡市, 深谷高俊: 重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟X線透写像についての考察—X線透写像による土壌と間隙に関する研究(I), 農土論集, 114, 61~68 (1984)
- 2) 片野学: 多収穫田と稲の根, 岩手大学農学部, 昭和58年度営農技術公開講座テキスト, 56~67 (1983)
- 3) 横井肇ほか: 土壌の透水係数の方向性について, 土肥誌, 40, 271~275 (1969)
- 4) 増島博: 水田下層土における飽和透水係数の異质性, 土肥誌, 41, 119~120 (1970)

(1985. 3. 6 受理)

#### Summary

(1) The real state of coarse pores (the diameter > 50  $\mu$ m) in the sample soils was radiographed by soft X-ray with "Heavy Liquid Infiltration Method". The sample soils were prepared by undisturbed sampling from clayey paddy field. The sampling depths were 15cm, 25cm, 35cm and 80cm.

(2) The infiltrating method of heavy liquid (contrast medium) to sample soils was improved exceedingly and that was named "Drying method".

(3) A permeability testing method was designed for bare (uncontained in cylinder) undisturbed sample and by this method the coefficient of permeability was measured for the sample which had been radiographed by H. L. I. method and Drying method. After the coefficient of permeability in vertical direction ( $K_V$ ) was measured, the horizontal permeability ( $K_H$ ) was measured for the same sample.

(4) The soft X-ray radiographs of soil pores showed exceeding development of root pores formed by rice. Vertical pores had 0.7~0.8mm diameters in maximum size or 0.4mm diameter in mean size and pores number per cm<sup>2</sup> was 1~1.5. Horizontal pores had nearly uniform diameter of 60~90 $\mu$ m and pores number per cm<sup>2</sup> was 2~5.

The anisotropic characteristics of pores distribution that had large diameter in vertical direction and small diameter in horizontal direction was very clear. It seemed that this characteristics induces the anisotropic permeability.

(5) The root bodies pieces found in Yahaba samples were 2.4~7.8% to the volume of noncapillary pores and that found in Hachirogata samples were 16.5~19.5% to the same. Then the pores in radiographs seemed almostly blank pores. Noncapillary pore was defined as a pores having over 100  $\mu\text{m}$  diameter in this report.

(6) The coefficient of permeability corresponded with the direction of pores distribution and  $K_V/K_H$  ratio for the samples having less depth of 35cm showed a few hundred.

The calculated values of permeability coefficients with Poiseuille formula for the vertical pores distribution approached nearly to measured  $K_V$  values.

But the Poiseuille formula was unsuitable for the horizontal pores distribution.

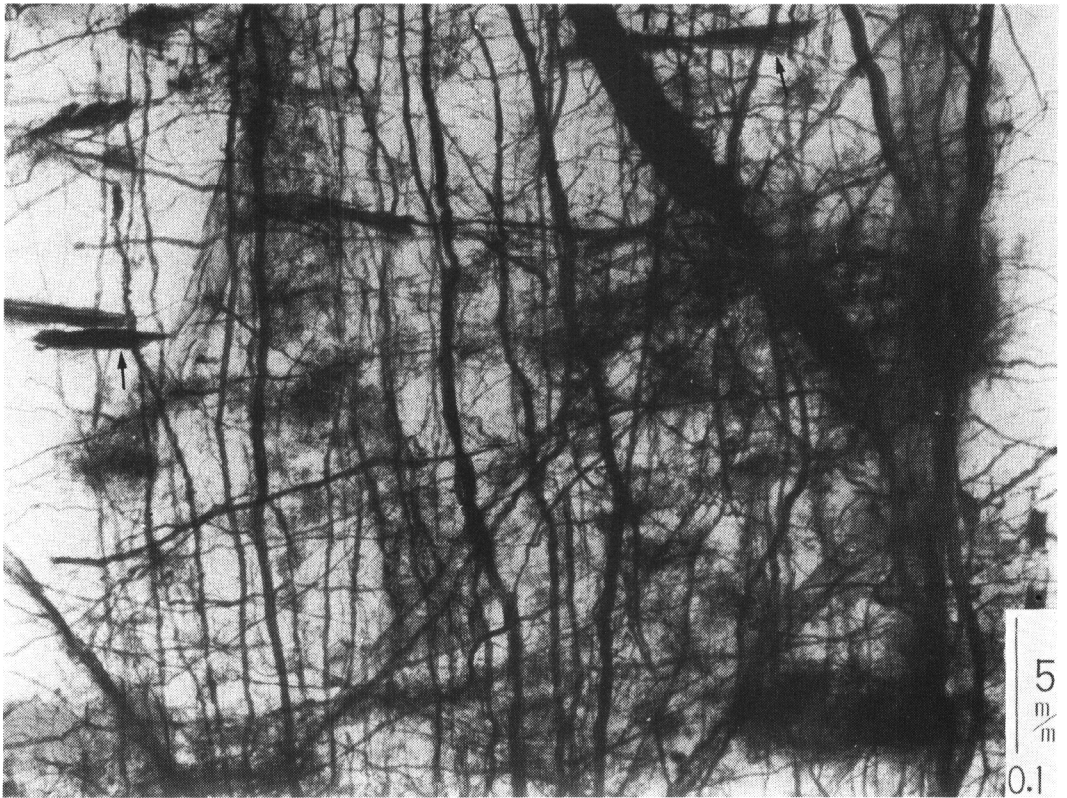
(7) Measured  $K_V$  values for the samples having less depth of 35cm were  $10^{-4}$  cm/s class. This values means that the permeability of clayey soil was improved by root formed pores.



▲写真1 -15cm(X面) 矢巾 ▼写真2 -15cm(Y面)







▲ 写真3 -35cm(Y面) 矢巾 ▼ 写真4 -80cm(Y面)







▲ 写真5    -15cm(X面) 八郎潟    ▼ 写真6    -15cm(Y面)





▲写真7 -25cm(Y面) 八郎潟 ▼写真8 -35cm(X面)



## デジタル式圧力調整器の製作

奥 山 武 彦\*

Digital pressure regulator

Takehiko OKUYAMA

National Research Institute of Agricultural Engineering

## I はじめに

加圧板法による pF 試験や、不飽和透水係数の測定などは供試体に一定の空気圧をかけて行う。これまで、圧力調整器としてマノメータ内の水や水銀の液面位置を触針や光電式で検知する方式が使われてきた。しかし、水マノメータは水の表面張力の影響で動作が不安定になったり、水銀マノメータは水銀でガラス管が汚れて見にくくなるなどの使用上の問題がある。

そこで、圧力センサーを用いて圧力を測定すると同時にデジタル制御する方法を検討した。デジタル制御という難しい気がするが、モジュール化された製品を組み合わせることによって、使用目的に合った装置を比較的容易に製作することができる。デジタル・メータリレーを用いた圧力調整器を試作したので、その概要を報告する。

## II 装置の構成

## 1. 設計目標

加圧板法による pF 試験の低圧領域及び Richards 型試験器による不飽和透水係数の測定に使用するために、対

象とする圧力は  $1 \text{ kg/cm}^2$  以下とした。この範囲で  $0.001 \text{ kg/cm}^2$  単位での圧力表示、制御を行うことを目標にして、定格  $1 \text{ kg/cm}^2$  の圧力変換器を使用した。  $1 \text{ kg/cm}^2$  以上の圧力が必要な時は空気ポンベの調整器で調圧することにしたが、高圧用の圧力変換器と緩衝タンクを使えばより高い圧力範囲でも本装置を使用できる。

## 2. 圧力変換器

各種の圧力変換器が市販されているが、今回使用したのは、箔ゲージタイプに比べて小型高感度な拡散形半導体圧力変換器であり、大気圧に対する圧力（ゲージ圧）を測る方式である（豊田工機 PD-104FW）。

圧力変換器には定格出力、つまり所定圧力に対する出力電圧の較正表がついているので、増幅器の増幅率をその定格出力値によって調整できるが、念のために実際に圧力をかけて検定することが望ましい。

圧力変換器の零点と定格出力が温度によって変動して誤差の原因となることがある。使用した圧力変換器の零点変動を7日間連続して測定した結果を図-1に示す。  $1^\circ\text{C}$  あたり、フルスケールの  $7.6 \times 10^{-3}\%$  で、製品の規格値の  $3 \times 10^{-2}\%$  より小さく、通常の使用には問題は無いことがわかった。

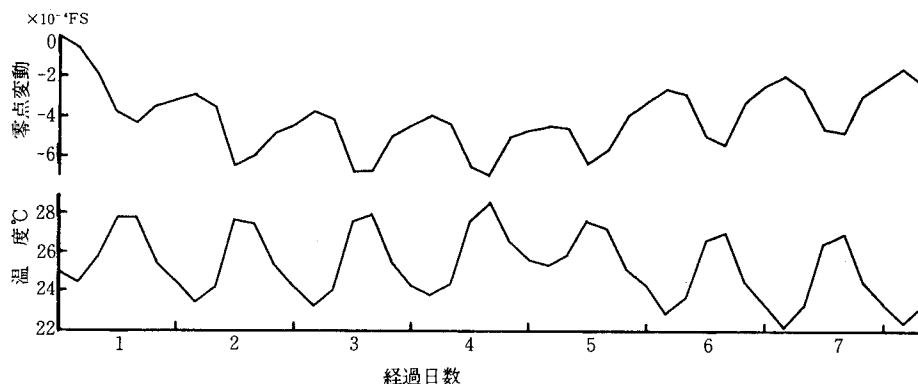


図-1 圧力変換器のドリフト

\*農業土木試験所

圧力変換器は増幅器と組み合わせて使用するが、増幅器を内蔵している変換器もある。また、直流増幅器のモジュールを使えば増幅器を比較的安価に自作することができる。

### 3. デジタル・メータリレー

デジタル・メータリレー（以下、DMR と略記する）は、直流電圧をデジタル表示するデジタル・パネルメータに、測定値が任意に設定した上・下値を逸脱しているかどうかを判断するコンパレータを一体にしたものである。回路構成を図-2に示す。

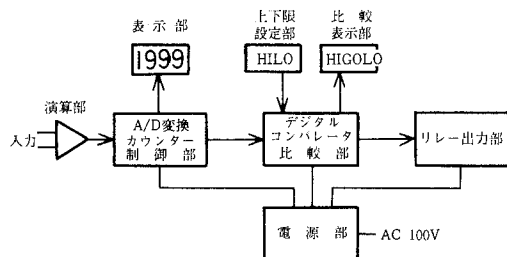


図-2 デジタル・メータリレーの回路

測定範囲、表示桁数、数字の大きさなどによって多くの機種があるが、今回使用したもの（旭計器 MDR-210-12）は、 $3\frac{1}{2}$ 桁の $\pm 1.999\text{V}$ 用である。4桁表示だが最上位桁は1だけなので $3\frac{1}{2}$ 桁と呼ばれる。上・下限値はデジタルスイッチでそれぞれ設定し、これを越えた場合には表示ランプがつき、内部リレーがONになるので、これを利用して制御機器を作動させることができる。

ここでは圧力 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ で増幅器の出力が $1\text{V}$ になるようにしたので、測定電圧の分解能 $1\text{mV}$ が水柱 $1\text{cm}$ に相当する。測定範囲内ではこの分解能は変わらない。表示・設定が水柱 $\text{cm}$ 単位なので、 $\text{pF}$ への換算が容易である。

### 4. コントローラの構成

DMRの出力用リレーの接点容量は抵抗負荷で $\text{AC } 100\text{V } 0.5\text{A}$ または $\text{DC } 24\text{V } 1\text{A}$ なので、電磁弁の開閉などには容量が不足である。そのために、図-3の配線図のようにコイルが $\text{AC } 100\text{V } 26\text{mA}$ 、接点電流最大 $5\text{A}$ の外部リレーを増設した。リレーや電磁弁のコイルは誘導負荷になるので、開閉時のアークに対する接点保護回路をつけた方が良い。

### 5. 圧力系統

圧力源には容量 $47\text{l}$ （充填量 $7\text{m}^3$ ）の空気ポンプを使用した。小型のダイヤフラム式ポンプの使用も試みたが、ポンプ始動時に同時に緩衝タンク内の圧力がポンプにかかるために使用圧力 $0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上では始動が困難であ

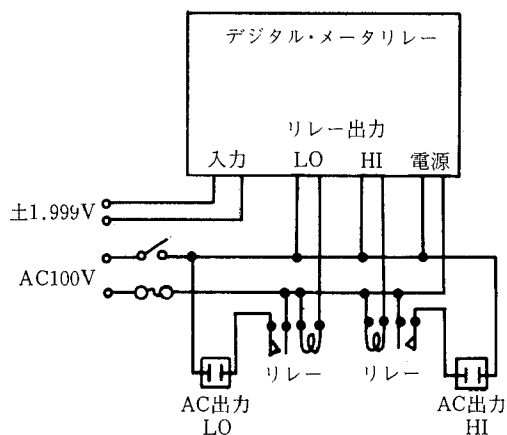


図-3 コントローラの配線図

た。この場合にはポンプと緩衝タンクの間には逆止弁を入れるなどの工夫が必要である。

空気ポンプには最大 $30\text{kg}/\text{cm}^2$ 用の調整器をつけ、本システムには $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の圧力を入れるようにした。

緩衝タンクは塩ビパイプと塩ビ板で $15\text{l}$ のものを作った。耐圧性には充分な注意が必要である。加圧板法の試験セルの容量は約 $7\text{l}$ である。

## III 制御特性

### 1. 試験方法

本システムによる圧力の制御特性及び緩衝タンクの機能を調べるために、図-4のように4通りの接続方法について試験を行った。すなわち、①緩衝タンクを用いない場合、②緩衝タンクを1個使い、そこで制御用の圧力を検出する場合、③緩衝タンクを2個直列にした場合、④緩衝タンクを2個使うが、試験セルで圧力を検出する場合、である。

圧力設定は、DMRで下限値を $0 \rightarrow 100 \rightarrow 200 \rightarrow 300 \rightarrow 400$  ( $\text{cm H}_2\text{O}$ )とステップアップさせた場合、 $400 \rightarrow 410$ の小変化の場合、 $400$ に設定しておいて試験セルの排気バルブから少しリークさせて圧力低下と加圧を反復する場合について行った。

### 2. 試験結果

上述の4種の接続方法での試験結果を表-1に、条件②で、 $200 \rightarrow 300$ に切換えた場合の緩衝タンク及び試験セルの圧力変化を図-5に示す。

緩衝タンクを用いた場合、試験セルとの間に圧力上昇の時間差が生じる。条件③以外では圧力が一定になる前にピークが現れた。図-5では、一定になるまでにコントローラが2回作動した様子がわかる。各条件下での特性をまとめると次のようになる。

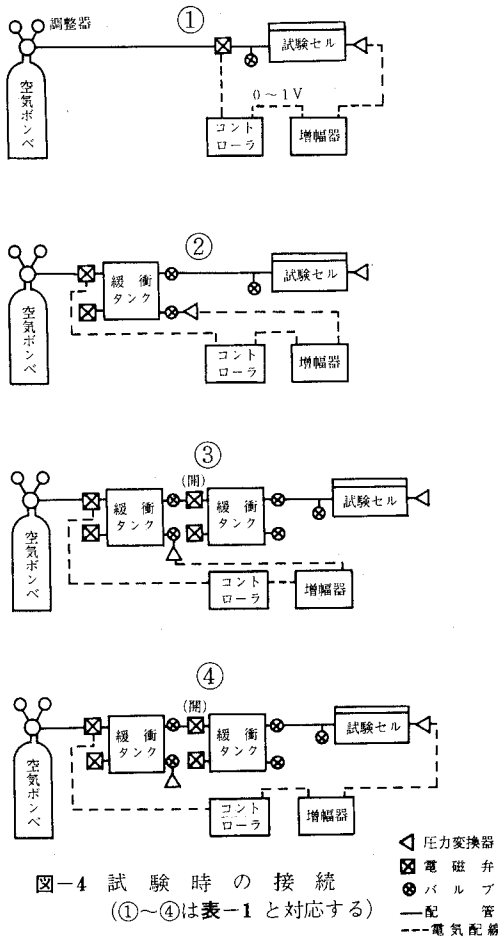


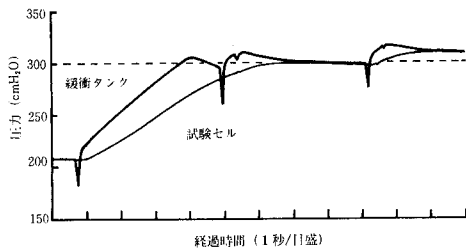
表-1 接続方法による試験セル内圧力の違い

設定圧力 (cm H <sub>2</sub> O)	項目	接続方法			
		①	②	③	④
100	ピーク圧力	147	114	103	142
	平衡圧力	124	112	〃	135
	平衡時間	11	10	21	16
200	ピーク圧力	221	212	202	240
	平衡圧力	204	207	〃	230
	平衡時間	10	8	21	19
300	ピーク圧力	327	310	306	327
	平衡圧力	303	304	〃	318
	平衡時間	12	17	28	20
400	ピーク圧力	413	410	405	429
	平衡圧力	400	405	〃	415
	平衡時間	25	18	28	25
410	ピーク圧力	447	418	410	427
	平衡圧力	440	413	〃	426
	平衡時間	11	9	4	2
リーク実験	作動圧力	397	400	400	400
	ピーク圧力	440	413	406	414

\*接続方法

- ①緩衝タンク無し
- ②緩衝タンク 1 個使用
- ③緩衝タンク 2 個使用
- ④緩衝タンク 2 個使用, セルで圧力検出

\*ピーク圧力, 平衡圧力, 作動圧力の単位はcmH<sub>2</sub>O  
平衡時間の単位は秒



設定値よりもかなり大きい。これは試験セルの圧力が設定値まで上がって加圧動作が停止した時には緩衝タンクの圧力はそれよりも高くなっており、遅れて試験セルに伝わるためである。

以上の結果から、②の接続方法が最も良いと思われるので、この方法を使うことにした。コンパレータの比較動作は毎秒約2.5回行われるので、その間の時間遅れは止むを得ない。この影響を小さくするためには、下限値を必要とする圧力よりも少し低めにセットしておくか、空気の供給量を絞ってやればよい。気温上昇等により、タンク内の圧力が上昇することがあるが、排気用の電磁弁をつけて上限値を設定してやることによって圧力の上昇を制限している。

IV おわりに

増幅器と表示器, コンパレータの機能をもつ指示計も市販されているが, 本装置は安価に作る事ができた。温度や変位なども, 直流電圧に変換することによって本

条件① 平衡までの時間は短い, ピーク圧力は高い。リーク試験でも, 緩衝タンクが無いために変動幅が大きい。

条件② 圧力が一定になるまでの時間は短く, ピークも小さい。

条件③ 緩衝機能が大きくなり, ピーク現象はなくなったが, 一定になるまでに時間がかかる。

条件④ 一定になるまでに時間がかかり, その圧力は

装置を応用することができるので、本報告が少しでも参考になれば幸いである。

設計・製作にあたっては農業土木試験場長谷川周一氏

と茨城大学大学院佐藤泰一郎氏から有益な助言を頂いた。謝意を表します。

(1984.12.22受理)



## 広い視野からの土壌物理研究を期待

菊 地 晃 二\*

北海道網走管内の農耕期間（5月～10月）における降水量は、500mm以下で、我が国での降水量の少ない地帯に入る。また、この降水量では作物が必要とする水分量としては不足で、かんがいが必要であるとされている。そのようなことから、網走管内の各地域においては、畑地かんがいのために、ダム建設が計画され、すでにその一部は着手されている。

昭和59年の網走管内における農耕期間の降水量は、305mmで、この値は平年値の62%に相当する著しく少ないものであった。このような気象条件のため、作物の中には著しいかんばつ害を受けるものがあり、その被害状況については新聞、テレビなどでも報道がなされた。

過日、北見統計情報事務所から、昭和59年度の最終作況報告書が公表されたが、それによれば秋播小麦、とうもろこし、いんげんまめなどは、かんばつを受け、その作況はやや不良～不良を呈し減収を招いた。一方、てん菜、春播小登、大豆、小豆などでは、その作況はやや良～良と、かんばつの影響はみられず、むしろ増収となった。

また昭和59年度、管内のいくつかの地域でかんがい試験が実施され、その結果をみると、ある土壌地帯ではかんがいによる効果が認められたが、別の土壌地帯では全く効果が認められなかった。

すなわち、網走管内は、我が国における降水量の少ない地帯で、一般年でも畑地かんがいが必要とされているが、昭和59年のようにまれにみる少雨年でも、土壌条件のちがいや、作物の種類によっては、むしろ平年作以上の収量が得られたのである。

以上のような事実からみて、畑地かんがいのような事業の計画、実施にあたっては、関係各機関の積極的参加

と総合検討および関係者による合意が必要と考えられる。そのような共通の理解が、このような土地改良事業の推進および定着に結びついていくものとする。とくに、土地改良における問題解決にあたっては、土壌物理分野の参加なくしては、真の解決は得られないものとする。したがって、土壌物理分野には、各地域における実態を把握し、各種問題の解決に対する積極的取り組みを希望する。

身近かある一事例について述べたが、事の大小は別にしても、このようなことは、我々の廻りに多くみられることである。

土壌物理分野に対する期待は、今まで多く報告のあった、「〇〇土壌の物理性」の研究段階には止まらず、それを基礎とした次の段階に研究を進めていただきたい。すなわち、例えば、物理性を異にする土壌が、異なる気象条件下で、いかなる反応を示しているのか。それらについて明らかにされていない場合には、問題が発生しても対策の立てようがないのである。もし明らかにされていれば、何を改善すべきか、解決するための道が開けられるものと思われる。このように段階的かつ発展的に研究を進めていかなければ、その成果は作物生産には結びついていかないものと思われる。

土壌物理研究が現場の農業の中で、安定した技術としての位置を占めるためには、幅広い視野からの物理研究が必要ではないかと思われるし、それが、今後の物理研究の飛躍にもつながるのではないかと思う。私の土壌物理研究に対する評価がまちがっていれば幸いであるが、いづれにしても、よりいっそうの土壌物理研究の発展を期待するものである。

(1985. 4. 23受理)

\*北海道立北見農業試験場

山内豊聡・前田 隆編著

## 本邦各種粘性土の土構造と工学的性質

(多賀出版 昭和60年刊)  
(A 5版, 253 P P, 8,600円)

粘質な土壌の取扱いは、粗粒な土壌に比べて複雑であり、むつかしいことは土壤物理学の分野でも土質工学の分野でも同じである。

粘質土をめぐる課題に対して工学的対応を可能にするためには、このような土を分類し、分布を調べ、その物理的・工学的性質を明らかにすることが必要である。本書はこのような視点から日本に分布する粘性土の諸性質を、特に土構造 (Soil structure 又は Soil fabric) の役割を重視して、研究成果をとりまとめたものである。

執筆は、土壤物理研究会に属する主として農業土木分野の研究者 (土壌工学) と土木工学分野によるものである。すなわち、「有機質土の物理的および力学的性質に関する研究」、「有機質土の土構造と力学的挙動に関する研究」、「日本に広く分布する結合性粘性土の土構造と力学的挙動に関する研究」と題する上記両分野の共同研究を背景にとりまとめられたものである。

当研究会の前田隆会長、故竹中肇東大教授をはじめ多くの土壤物理研究者が参画して研究され、多くの会員が執筆しており、分類した粘性土の物理・工学的特徴をとりまとめる中で、今後も土壤物理学の研究者に求められる土壌の物性に関する諸課題を提起している。

構成とその内容は、

- 第1章 序論。土質工学と土壌工学、土構造、新しい土質工学の側面と本書の内容
- 第2章 本邦粘性土の成因と分布。本邦粘性土の概観、火山灰土、東海地方の洪積台地に分布する黒ぼく、高有機質土
- 第3章 土構造とその評価。粘性土の構造と評価の方法
- 第4章 火山灰土の土構造と工学的性質。火山灰土の土構造、土構造と物理的性質、土構造と工学的性質
- 第5章 低有機質土の土構造と工学的性質。低有機質土の土構造、土構造と物理性、行動単位の安定性、土構造と工学的性質
- 第6章 高有機質土の土構造と工学的性質。土構造と物理化学的性質、土構造と工学的性質
- 第7章 沖積粘性土の土構造と工学的性質。沖積粘性土の土構造、土構造と透水性、土構造と圧密特性、結合性自然粘性土の破壊規準、沖積粘性土の土構造と流動

特性

## 第8章 結論。

これまで土の工学的性質に関するとりまとめや土に力学的働きを行うときの記述には、土の構造に係わる記述や考察が中心となることは少なかった。これに対し、本書では土の構造を重視し、粘性土で特に重要な構造の役割を考慮して土の物理的・工学的性質をとりまとめていることは意義が深い。粘性土では室内試験の結果を現場に適用する場合の鍵になるのがこの土の構造に対する認識であると考えられるからである。土壤物理学で研究対象としてきた団粒や各種に区分される土壌構造を工学的働きかけの場としてどのように位置づけ、取扱うべきであるかは土木工学のみならず我々にとっても大切な課題である。

従来の土壌生成過程の中で考えた土壌構造は、より速やかにより大きな力を受ける力学的場においてどのように挙動し、どのように研究されるべきものであるのかを考えることが求められていると思えるからである。

境界領域の成果として、将来、分野にまたがる包括的まとめが求められる項目として次のことが読みとれる。

(1)土木工学で対象となる土 (地盤) は、農業で扱う土壌や母材よりも広範で、より下層土を対象とするとともに表面の区分は土壌学ほど細分されず、土性とコンシステンシー、有機物の有無によるより材料的分類が行なわれている。第7章は地盤全体の土を対象としており、第4章～6章は土壌が中心対象になっている。構造を考えた土の性質を明らかにするとき、層序までを考えるのか、表層土、下層土程度の大きな差による区分でよいのか、層理の特徴程度でよいのか、土壤物理学にはそれらの区分又は包括が求められる。

(2)土壤物理研究会編の用語事典は各土壌の物理性に関するデータを整理して好評を得たが、本書は対象土の物理・工学的性をとりまとめている。土質工学では、粒径75mm以下の地盤材料を土質材料とし、74 $\mu$ m以下の粒子の量によって粗粒土、細粒土に分け、細粒土はコンシステンシー試験による塑性図によってシルト、粘性土、有機質土、火山灰質粘性土に細分する。ほかに高有機質土 (ピート及黒泥) が加わる。本書は、火山灰質粘性土、



有機質土，高有機質土，粘性土についてとりまとめている。土壌学の分類との関連性の整理は今後の課題である。

(3)団粒の詰まり方，団粒内の土粒子の詰まり方，外力によるこれらの構造の変化の3点の重要性を指摘し，構

造モデルを整理している。土壌の微細構造が上記内容と係わる課題の解明は今後求められる大きなテーマである。

(多田 敦)

# 会 務 報 告

(昭和59年11月1日～昭和60年5月31日)

**昭和59, 60年度役員**

- 会 長 前田 隆 (北 大)
- 副 会 長 小川 和夫 (北 農 試)
- 幹 事
- (会計) 相馬 尅之 (北 大)
- (庶務) 矢沢 正士 ( 〃 )
- (編集) 相馬 尅之 ( 〃 )
- ( 〃 ) 波多野隆介 ( 〃 )
- 編集委員会
- 委 員 長 斎藤万之助 (開 発 局 土 試)
- 委 員 塩崎 尚郎 (北農試畑作部)
- 〃 前田 要 (道 中 央 農 試)
- 〃 長沢 徹明 (北 大)
- 〃 矢沢 正士 ( 〃 )

**評 議 員**

- [北海道] 前田 隆 (北大), 斎藤万之助 (開発局土試), 相馬尅之 (北大)
- [東 北] 徳永 光一 (岩大)
- [関 東] 石井一夫 (農研センター), 河野広(農土試), 田淵俊雄(茨大), 長野間宏(農研センター), 長谷川周一(農土試), 安富六郎 (茨大)
- [中 部] 足立忠司 (岐阜大)
- [近 畿] 高橋 強 (京大)
- [中四国] 箱石 正 (中国農試), 矢野久友(鳥取大)
- [九 州] 黒田 正治 (九大)
- [委 嘱] 有村玄洋(宮崎県総農試), 金子淳一 (秋田農試), 三好 洋(千葉県地域整備協会)
- 会計監査 大垣 昭一(道中央農試), 岸 洋一(開発局土試)

**諸会議開催経過**

- 1, 事務局会議 (昭59,11,5,於農土試)  
(出席者) 岩田, 河野, 長谷川, 足立, 井上  
1) シンポジウム開催について  
2) 会費値上げについて  
3) その他
- 2, 昭和58年度第2回評議員会 (新旧合同, 昭59. 11. 22, 於農土試)  
(出席者) 東山, 石井, 相馬, 田淵, 古賀, 前田 (隆), 前田 (乾), 安富, 久保田, 中野, 諸遊, 古畑, 寺沢, 多田, 箱石, 三野, 粕淵, 岩田, 河野, 長谷川(以上評議員), 足立, 奥山, 井上(以上事務局)

- 1) 経過報告
- 2) 編集委員会報告
- 3) 土壤物理研究会会則改正案 (第5条会費) 承認
- 4) 58年度決算案, 59年度予算案～承認
- 5) 58年度会計監査報告
- 6) 昭和59・60年度評議員選挙結果報告
- 7) 昭和59・60年度役員選出
- 8) その他
- 3, 昭和59年度総会 (昭和59,11,22, 於農土試)
  - 1) 経過報告
  - 2) 編集委員会報告
  - 3) 土壤物理研究会会則改正案 (第5条会費)～可決
  - 4) 58年度決算案, 59年度予算案～可決
  - 5) 58年度会計監査報告～承認
  - 6) 次期役員の紹介
  - 7) その他
- 4, 事務局会議 (新旧引継, 昭和59,11,21, 於農土試)  
(出席者) 河野, 足立, 長谷川, 井上, 奥山, 相馬, 矢沢
  - 1) 会務の引継
- 5, 事務局・編集委員会合同会議 (昭和60,1,24, 於北大)  
(出席者) 前田(隆), 小川, 相馬, 波多野, 斎藤, 塩崎, 前田(要), 長沢, 矢沢
  - 1) 59年度の会の運営について
  - 2) 会誌51号について (編集・査読)
  - 3) 第27回シンポジウムについて
  - 4) その他
- 6, 編集委員会 (昭和60,4,12, 於北大)  
(出席者) 斎藤, 塩崎, 相馬, 長沢, 波多野, 矢沢
  - 1) 会誌51号の編集について
  - 2) 会誌51号の査読結果について

**会員の動向**

1, 会員数 (昭和60年5月31日現在)

地 区	会員数	地 区	会員数
正会員及び学生会員	633	栃 木	7
北 海 道	64	群 馬	5
東 北		埼 玉	14
青 森	17	千 葉	12
岩 手	20	東 京	40
宮 城	10	神 奈 川	13
秋 田	7	山 梨	4
山 形	19	新 潟	13
福 島	3	中 部	
関 東		静 岡	12
茨 城	113	愛 知	16

## 会 務 報 告

地 区	会員数	地 区	会員数
三 重	16	香 川	13
岐 阜	7	愛 媛	9
長 野	8	高 知	6
富 山	6	九 州	
石 川	6	福 岡	14
福 井	1	佐 賀	12
近 畿		長 崎	4
滋 賀	4	大 分	2
奈 良	0	熊 本	4
京 都	12	宮 崎	11
大 阪	23	鹿 児 島	14
兵 庫	14	沖 縄	4
和 歌 山	1	海 外	3
中国・四国		賛助会員	3
鳥 取	19	購読会員	52
島 根	8		
岡 山	5		
広 島	10		
山 口	7		
徳 島	1	合 計	688

## 2, 新入会員

なし

## 3, 退会者

奥村純・(北海道), 小林荘司(北海道), 高尾英男(北海道), 高畑 滋(北海道), 松居勝広(北海道), 伊藤明治(岩手), 寿松木章(福島), 長谷川文男(茨城), 増田治策(栃木), 伊藤一幸(埼玉), 黒部 隆(東京), 山田 裕(東京), 古藤 実(神奈川), 林 勇(神奈川), 石上 清(静岡), 白石良輔(静岡), 伏見 弘(静岡), 下野園正(長野), 岡 太郎(京都), 藤谷武雄(大阪), 嘉門保彦(兵庫), 田中平義(兵庫), 中橋勇作(兵庫), 塚本 吉朗(広島), 坂上行雄(山口), 近藤博幸(高知), 高木睦夫(福岡), 畠中 洋(福岡), 森 信行(熊本), 藤島哲男(鹿児島), 岡部達雄(東京)

## 4, 住所変更

氏 名	旧	新しい連絡先
土屋 一成	北海道	514-23 安芸郡安濃町草生360 野菜試
前田 要	北海道	069-13 夕張郡長沼町東6線北 15号道立中央農試
南 松雄	北海道	082 河西郡芽室町新生 道立十勝農試
吉田 裕一	青 森	036 弘前市下白銀町14の2 中南土地改良事務所
中川 慎治	東 京	100 千代田区大手町1-3-4 気象庁企画課気象変動対策室

氏 名	旧	新しい連絡先
工藤 裕晃	地名変更	982-02 仙台市旗立2-2-1 宮城県農業短大
小関 恭	〃	〃
塩谷 勝	〃	〃
富樫 千之	〃	〃
富田 道久	〃	〃
斎藤 三郎	山 形	990 山形市鉄砲町2丁目19の 68山形県中央蚕糸指導所
中川昭一郎	茨 城	305 筑波郡谷田部町観音台2-1-2 農土試
安養寺久男	茨 城	069-01 札幌市豊平区羊ヶ丘1 北海道農試
鬼 鞍 豊	茨 城	300-12 茨城県牛久町刈谷 5-83-4
佐藤泰一郎	茨 城	113 文京区弥生1-1-1 東京大学農学部(学生会員)
服部 重明	茨 城	612 京都市伏見区桃山町永井久 太郎官有地 林試関西支場
久保 博	東 京	359 所沢市並木3-1-12-510
藤井 克己	東 京	020 盛岡市上田3-18-8 岩手大学農学部
三浦 泰昌	神奈川	259-12 平塚市寺田縄496 神奈川県農総研
馬場 昂	新 潟	950-21 新潟市五十嵐二の町 7492-136
南 信行	新 潟	272-01 浦安市富士見2-11-11 高橋ハイソ 502
荒木 浩一	愛 知	476 東海市加木屋町論田5-110
磯島 義一	三 重	519-04 三重県度会郡玉城町 田丸104の5(自宅)
中村 伴蔵	長 野	381-12 長野市松代町大室2206 長野県野菜花き試験場
丸山 武雄	石 川	921 金沢市米泉町2-84-2
清水 正之	大 阪	535 大阪市旭区赤川4の11の5
福田 光治	大 阪	564 吹田市垂水町3-24-14 グリーンコーポ江坂 2-612
加護谷栄章	兵 庫	673 神戸市西区伊川谷町前開471 (自宅)
沢田 富雄	兵 庫	67 明石市東野町2022 県職住2-216(自宅)
鈴木 正佳	鳥 取	680 鳥取市吉成463(自宅)
鈴木 達彦	広 島	425 焼津市栄町1-7-9第1海洋B 微生物応用技術研究所
根本 清一	番地変更	721 福山市西深津町6丁目12-1 中国農試
箱石 正	〃	〃
松行 輝夫	宮 崎	880 宮崎市橘通東1-9-10 宮崎県中部農林振興局
山村 善洋	宮 崎	889-21 宮崎市大字熊野7710 宮崎大学農学部
小原 秀雄	鹿児島	894 名瀬市浦上503 鹿児島県農試大島支場
松下研二郎	鹿児島	892 鹿児島市城山2丁目32-12
草水 崇	鹿児島	893 鹿屋市寿町5丁目24-4(自宅)
野々山芳夫	鹿児島	470-23 愛知県知多郡武豊町 南中根45 野菜試施設栽培部
金子 文宜	千 葉	280-02 千葉市大金沢町941-1 千葉県農業化学検査所

## 会計報告

59年度総会において、58年度決算案、59年度予算案が可決されました。

## 昭和58年度会計決算

(昭和59年10月31日現在)

	項 目	予 算 額	決 算 額	増 減	備 考
収入の部	繰越金	1,616,730	1,616,730	0	
	賛助会費	45,000	0	△ 45,000	一般会計年度末支払いのため
	購読会費	220,000	218,500	△ 1,500	
	一般会費	2,072,000	2,354,500	282,500	正会員3,000円×778.17口、正会員2,000円×6口、学生会員2,000円×4口
	出版物売上	10,000	126,000	116,000	バックナンバー
	雑収入	20,000	53,288	33,288	利息、印税
	合 計	3,983,730	4,369,018	385,288	
支出の部	会誌製作費	2,500,000	1,448,160	1,051,840	会誌48, 49号
	総会費	250,000	164,510	85,490	シンポジウム運営費
	通信費	250,000	189,185	60,815	会誌発送(2回)、事務及編集連絡
	文具費	10,000	7,750	2,250	消耗文具類
	貸金	50,000	13,800	36,200	会誌発送手伝い
	交通費	70,000	1,980	68,020	
	会議費	30,000	29,800	200	評議員会(2回)
	幹事手当	40,000	40,000	0	4名
	編集委員会費	200,000	137,530	62,470	査読料、日当、座談会
	選挙管理委員会費	250,000	247,610	2,390	名簿印刷、発送費
	予備費	333,730	110,000	223,730	バックナンバーコピー製本費
	繰越金		1,978,693	△ 1,978,693	
	合 計	3,983,730	4,369,018	△ 385,288	

## 昭和59年度土壌物理研究会予算

	項 目	予 算	備 考
収入の部	繰越金	1,978,693	
	賛助会費	45,000	15,000円×3口
	購読会費	252,000	4,500円×56口(53団体)
	一般会費	2,292,000	3,500円×652口、2,000円×5口
	出版物売上	150,000	バックナンバー(135,500は内定)
	雑収入	50,000	利息、印税、50号広告代(25,000は内定)
	合 計	4,767,693	
支出の部	会誌製作費	3,000,000	50号(1,400,000)、51、52号(各800,000)
	総会費	430,000	59年11月シンポジウム経費、60年11月シンポジウムポスター印刷・発送費、会員拡大費
	通信費	250,000	会誌発送3回、郵送料、事務連絡
	文具費	60,000	消耗文具類、ゴム印、封筒
	貸金	50,000	会誌発送(3回)、事務整理
	交通費	50,000	事務局会議、評議員会
	会議費	40,000	評議員会、会計監査
	幹事手当	40,000	10,000円×4名
	編集委員会費	150,000	査読料、日当
	選挙管理委員会費	0	
	予備費	697,693	
	合 計	4,767,693	

## — 編 集 後 記 —

北海道で土壌物理研究会の運営を担当するのは10年ぶりのこととなります。また、前田会長と斉藤編集委員長は前回の役員経験を生かしていただくこととなりました。任期は昭和59年11月より昭和61年10月までの2ヶ年間で、土壌物理研究会発展のため役員一同微力ながらお役に立ちたいと思っておりますので、よろしく願います。

役員会、査読、編集委員会とまざまずの滑り出しとなり第51号の発刊にこぎつけました。本号は、第26回シンポジウム「土壌構造の改良をめぐる諸問題」の特集号ですが、企画、構成およびシンポジウムの開催については前役員のお御努力に負うところが大きく、今回はそ

の最後のお手伝いをしたというところでしょうか。さらに、講師の方々には、いずれも内容の豊富な論文をお送りいただきありがとうございました。

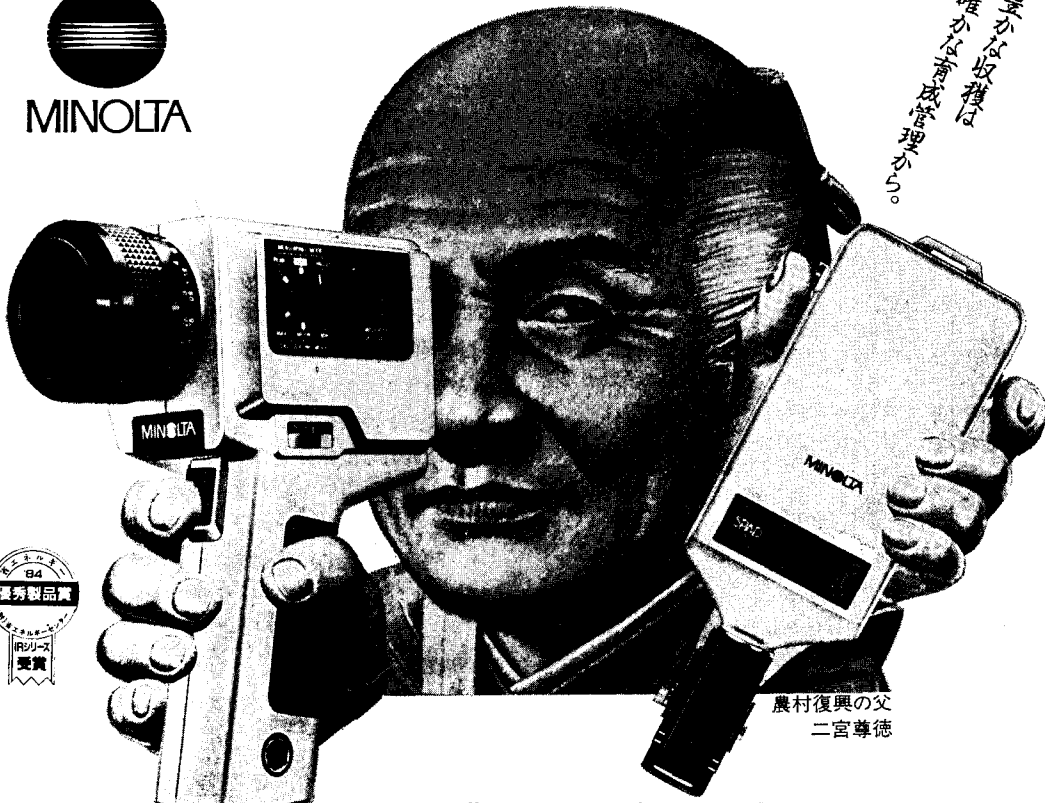
北海道では土壌の物理性が作物の生育に重要な役割を果たす場合が多く、農業関係者の間でも深い関心が持たれています。したがって、北海道らしい企画も折り込んでみてはなどと考えたりしております。

最後に、今後の会の運営に対して会員皆様方の御協力および御指導をお願いいたします。

(塩崎尚郎)



豊かな収穫は  
確かな測定で実現できる。



農村復興の父  
二宮尊徳

農作物の育成は、  
数値で管理する時代。

葉を傷めずに葉緑素をチェック。  
追肥量のコントロールに役立ちます。

作物の葉を測定ヘッドに挿入し、ボタンを押すだけで含まれているクロロフィル(葉緑素)量を瞬時に測定。デジタルで表示します。これまでのように、作物を切りとって測定する必要もありません。得られたデータをもとに作物の栄養状態を知ることができ、追肥料のコントロールなどに活用できます。

栄養診断に役立つ  
コンパクトな計測器  
葉緑素計 **SPAD-501**

本器は、農林水産省農業園芸局農産課の土壌作物体分析機器開発事業一(Soil & Plant Analyzer Development, 略称SPAD)による開発製品です。

作物や土壌の表面温度をチェック。  
育成温度が管理できます。

-50℃~1000℃の幅広い温度域を、触れずに測定します。測定値は、ファインダー内にデジタルで表示されますから、測定する箇所を見ながら、同時に読みとれます。お茶や野菜、土壌などの温度管理に幅広くお役にたください。

待望の  
非接触ハンディタイプ  
放射温度計 **IR-0510**

一姉妹品一  
IR-630  
(600℃~3000℃)  
IR-308  
(250℃~800℃)

お問い合わせ・ご用命は下記まで  
ミノルタカメラ販売株式会社 産業特機部  
〒104 東京都中央区銀座4丁目9番5号 TEL (03) 542-1269代  
〒541 大阪市東区備後町2丁目45番地(日本精化ビル) TEL (06) 201-5851代